CIRIAF
Centro Interuniversitario
di Ricerca sull'Inquinamento
da Agenti Fisici - "Mauro Felli"

Università
degli Studi di Perugia
Facoltà di Ingegneria

10° Congresso Nazionale Ciriaf

Sviluppo Sostenibile,
Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Atti



Perugia 9/10 aprile 2010

Centro Interuniversitario
di Ricerca sull'Inquinamento
da Agenti Fisici - "Mauro Felli"

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

10° CONGRESSO NAZIONALE CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Perugia, 9 - 10 aprile 2010
Facoltà di Ingegneria

Morlacchi Editore

In copertina: foto di Carlo Bonini

Si ringraziano per il loro contributo:

Università degli Studi di Perugia, Facoltà di Ingegneria
Consorzio IPASS
C.R.B. Centro di Ricerca sulle Biomasse
EHT Italia srl

Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2010.
ISBN 978-88-6074-339-8 (print)

ISBN 978-88-9392-183-1 (online)

L'edizione digitale on-line del volume è pubblicata ad accesso aperto su www.morlacchilibri.com. La presente opera è rilasciata nei termini della licenza Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0: http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode). La licenza permette di condividere l'opera, nella sua interezza o in parte, con qualsiasi mezzo e formato, e di modificarla per qualsiasi fine, anche commerciale, a condizione che ne sia menzionata la paternità in modo adeguato, sia indicato se sono state effettuate modifiche e sia fornito un link alla licenza.

© 2010 Morlacchi Editore University Press

Pubblicato da Morlacchi Editore University Press, Piazza Morlacchi 7/9, 06123 Perugia
www.morlacchilibri.com

COMITATO SCIENTIFICO E ORGANIZZATORE

prof. Gino Moncada Lo Giudice (Presidente)

prof. Francesco Asdrubali
ing. Gianni Brambilla
prof. Cinzia Buratti
prof. Massimo Coppi
prof. Franco Cotana
prof. Andrea de Lieto Vollaro
prof. Umberto Di Matteo
prof. Giorgio Galli
prof. Giorgio Guattari
prof. Domenico Laforgia
prof.ssa Anna Magrini
prof. Edoardo Marcucci
prof. Angelo Milone
prof. Giorgio Raffellini
prof. Gianfranco Rizzo
prof. Federico Rossi
prof. Lucio Vegni

SEGRETERIA ORGANIZZATIVA

Maria Angela Polverini *(segreteria CIRIAF)*
Ilaria Castellini *(segreteria CIRIAF)*
Leandro Lunghi *(impaginazione e stampa)*
Roberto Fiorella *(impaginazione e stampa)*
Francesco D'Alessandro *(impaginazione e stampa)*

INDICE

Qualità dell'Ambiente Costruito e Inquinamento Indoor

Analisi dei parametri antropometrici di etnie diverse
ai fini del comfort termoigrometrico indoor.
V. Franzitta, F. P. Lo Curcio, A. Nucara, G. Scaccianoce, M. Tripodi ..... pag. 3

Modellazione numerica e validazione sperimentale della generazione e del trasporto
di Radon all'interno di quattro edifici collocati in diverse località del Veneto.
G. Villi, M. De Carli, C. Bigliotto, A. Bertolo ..... pag. 9

Studio acustico centro congressi in Costa Smeralda.
G. Strani, C. Luci, R. Ragni, S. Primieri ..... pag. 15

Valutazione del microclima luminoso in ambiente scolastico tramite approccio adattivo.
A. Galatioto, A. Milone, S. Pitruzzella ..... pag. 21

Il benessere termoigrometrico negli ambienti di lavoro: analisi di risultati sperimentali
ed elaborazione di questionari.
P. Ricciardi, C. Buratti, A. Bonavita, F. Gianelli ..... pag. 29

Comfort termoigrometrico negli impianti natatori.
Indagine sperimentale ed analisi critica sull'applicazione dei requisiti
prescritti dalla legislazione nazionale.
D. Sepulcri, R. Spinazzè ..... pag. 35

Caratterizzazione acustica del teatro della filarmonica di Corciano.
M. Vergoni, M. Urbani, M. Faleri ..... pag. 41

Screening diagnostico di base per la compatibilità ambientale
nei beni architettonici museali.
G. Cannistraro, L. De Santoli, A. Romagnolo ..... pag. 47

Il comportamento passivo degli edifici storici: una proposta di categorizzazione.
F. Cipriani ..... pag. 55

Efficienza e Certificazione Energetica degli Edifici

Valutazione energetica degli edifici: confronto tra codici di calcolo stazionari e dinamici.
F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. Bianchi, F. Sciurpi, C. Carletti ..... pag. 63

UNI TS 11300 parte 1 – Applicazione a casi semplici di edilizia residenziale:
considerazioni sulle modalità di calcolo e proposte
per una maggiore comprensione di alcuni aspetti.
A. Magrini, L. Cattani, L. Magnani ..... pag. 69

UNI TS 11300 parte 2 – Applicazione a casi semplici di edilizia residenziale:
considerazioni sulle modalità di calcolo e proposte
per una maggiore comprensione di alcuni aspetti.
A. Magrini, L. Cattani, L. Magnani ..... pag. 77

La certificazione di sostenibilità ambientale degli edifici della Regione Umbria.
G. Marchetti, M. Bagagli ..... pag. 83

Valutazione dell'efficienza energetica dell'architettura e green urban conservation.
D. E. Massimo, A. Barbalace ..... pag. 89

Progetto sostenibile di nuovi stabilimenti balneari.
G. Raffellini ..... pag. 95

Certificazione energetica degli edifici basata sul metodo asset rating:
principali errori nelle procedure di calcolo.
D. Milone, S. Pitruzzella ..... pag. 99

Analisi del ciclo di vita:
applicazione ad un edificio residenziale ad elevate prestazioni di risparmio energetico.
C. Buratti, M. Goretti, M. C. Merico ..... pag. 105

Prestazioni di differenti strategie di ventilazione e di sistemi di schermatura solare
per edifici residenziali in area mediterranea.
F. Sciurpi, C. Carletti, L. Pierangioli ..... pag. 111

Dallo studio del processo edilizio alla determinazione delle linee guida
per una progettazione eco-sostenibile: un caso studio.
G. Cannistraro, C. Staiti, D. Germanò, D. Plutino, M. Castelluccio ..... pag. 117

Indice di efficienza energetica: valutazione delle caratteristiche prestazionali
per la certificazione degli edifici attraverso esperienze applicative.
A. Milone, D. Milone, S. Pitruzzella ..... pag. 123

Inquinamento Acustico e da vibrazioni

La valutazione della popolazione esposta in un'area industriale.
F. Asdrubali, M. Filipponi, S. Schiavoni, O. Baglioni, L. Bennati ..... pag. 133

Interventi di risanamento e rumore autostradale a Genova.
A. Conte ..... pag. 139

Indagine sul rumore portuale a Genova.
A. Conte ..... pag. 145

Introduzione e prime validazioni di un nuovo metodo di valutazione del disturbo da rumore.
A. Badagliacca, M. Coppi, A. Venditti ..... pag. 151

Le valutazioni di clima e di impatto acustico: strumenti e problematiche connesse.
A. Papa, R. Mariconte ..... pag. 157

Monitoraggio acustico piste motoristiche settore velocità:
adempimenti normativi e regolamentazione sportiva.
G. Strani, C. Luci, M. Fiorentino ..... pag. 163

Rappresentazione della situazione acustica del territorio mediante indici sintetici di criticità.
D. Sepulcri, F. Remigi, F. Zulato ..... pag. 169

Rumore prodotto da impianti eolici: esperienze di misura.
S. Curcuruto, D. Atzori, R. Betti, E. Lanciotti, G. Marsico, F. Sacchetti, R. Silvaggio ..... pag. 173

Fonoisolamento di serramenti in legno:
influenza dei componenti sulle prestazioni complessive.
G. Moncada Lo Giudice, C. Buratti, E. Moretti, E. Belloni ..... pag. 179

Barriere acustiche: studio della forma, ottimizzazione delle prestazioni acustiche,
problematiche di inserimento ambientale.
M. Strada, P. Romagnoni, A. Lisiero, S.Verza ..... pag. 185

Esperienze di architettura sonora nella progettazione acustica delle piazze.
S. Luzzi, R. Bellomini, R. Natale, B. Gentili ..... pag. 193

Esperienze e riflessioni sul monitoraggio a lungo termine del rumore ambientale.
G. Brambilla, P. Verardi ..... pag. 199

La valutazione del rischio da vibrazioni meccaniche
per i lavoratori del servizio di igiene urbana.
M. Pera ..... pag. 205

Aspetti progettuali e biomeccanici di un sedile per macchinista ferroviario
P. Pascolo, S. Grimaz, G. Franceschini ..... pag. 209

Impatto Ambientale

Misure di Radon outdoor: risultati e correlazioni con la stabilità atmosferica
e la qualità dell'aria in Pianura Padana.
L. Erbetta, D. Bianchi, G. Dellacasa, V. Garbero ..... pag. 219

Effetto sulle emissioni inquinanti dell'adozione
del Piano Regolatore Portuale della città di Messina.
C. Marino, A. Nucara, M. Pietrafesa, A. Pudano, M. Tripodi ..... pag. 225

La valutazione dell'impatto ambientale all'interno degli edifici
per radiazioni ionizzanti e non.
Gi. Nicoletti, Ge. Nicoletti ..... pag. 231

Analisi e confronto dell'inquinamento atmosferico tra il centro urbano di Roma
e un comune della prima corona dell'area metropolitana.
D. Persiani, P. Prignani ..... pag. 235

Scenari di qualità dell'aria per l'Umbria e il centro Italia:
l'applicazione del modello di dispersione chimico-fisico Chimere.
M. Angelucci, M. Vecchiocattivi, S. Crocchianti, F. Pianigiani ..... pag. 241

Sulla riduzione dei macroinquinanti atmosferici in Italia
derivante dall'applicazione della normativa IPPC ai grandi impianti industriali.
D. Ticali, F. Cotana, M. C. Merico, S. Rinaldi ..... pag. 247

Emissioni di polveri ultrafini nei processi di cottura:
fattori di emissione e analisi della volatilità.
G. Buonanno, L. Stabile, A. Viola ..... pag. 253

Riconoscimento alle associazioni ambientaliste della legittimazione ad agire in giudizio
per la tutela del patrimonio ambientale, culturale, storico, artistico e dell'assetto del territorio.
E. Colaiuta ..... pag. 259

Analisi dei costi di tecniche combinate di decontaminazione elettrocinetica e phytoremediation.
A. Di Mulo, M. Lupo, D. Ticali ..... pag. 263

Procedura di valutazione dell'impatto ambientale da dilavamento
di pavimentazioni stradali sui corpi idrici ricettori.
A. Di Mulo, M. Lupo, D. Ticali ..... pag. 269

360° green revolution: sostenibilità ambientale di un'azienda agricola certificata ISO 14064.
F. Cotana, S. Rinaldi, M. Barbanera, L. Fasola Bologna ..... pag. 277

Fonti e Sistemi Energetici

Autorizzazione di impianti per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile: procedure e criticità.
E. Barbieri, F. Stragapede, A. Conte ..... pag. 285

Studio di impatto e analisi delle criticità legati alle linee ad alta tensione nella provincia di Alessandria.
E. Parisato, L. Erbetta, E. Biorci, C. Coffano ..... pag. 291

Pannelli fotovoltaici di terza generazione basati su materiali plasmonici.
P. Di Rosa, G. Guattari, L. Vegni, F. Bilotti, A. Toscano ..... pag. 297

Life cycle assessment of sunflower and rapeseed cultivation for biodiesel production.
F. Cotana, M. Barbanera, F. Fantozzi ..... pag. 301

Impianti di produzione energetica da oli vegetali: sviluppi tecnici, tendenze progettuali e problematiche autorizzative.
G. Strani, C. Luci, R. Ragni ..... pag. 307

Assorbenti solidi e semisolidi in impianti termici elioassistiti.
G. Galli, A. de Lieto Vollaro, R. de Lieto Vollaro, E. de Lieto Vollaro ..... pag. 313

Studio di fattibilità di camini solari nell'edilizia residenziale.
M. Coppi, F. Salata, A. Quintino ..... pag. 317

Cippato di legna per l'edilizia residenziale: il primo impianto termico in Umbria.
G. Cavalaglio, S. Cotana, A. Petrozzi ..... pag. 321

Scambio termico convettivo nei componenti elettronici: modello CFD del transitorio di riscaldamento per un'aletta di raffreddamento.
C. Sapia, G. Sozio ..... pag. 327

Scambio termico in convezione naturale/forzata per celle fotovoltaiche a media concentrazione.
F. Rossi, A. Nicolini, B. Castellani, M. Giuliobello ..... pag. 331

Nuovo reattore sperimentale per la produzione di gas idrati.
F. Rossi, F. Cotana, B. Castellani, M. Filipponi ..... pag. 337

Pianificazione economico-finanziaria di impianti a biomassa.
M. Versiglioni, F. Cotana, G. Cavalaglio, F. Riccardi ..... pag. 343

Equilibrium heat and moisture transfer in soils with heat sources.
G. Galli, A. Vallati ..... pag. 349

L'idrogeno come opzione energetica sostenibile.
Gi. Nicoletti, Ge. Nicoletti ..... pag. 355

Mobilità Sostenibile

Il trasporto aereo e lo sviluppo sostenibile.
E. Valeri ..... pag. 363

Uso di mezzi a due ruote e politiche di tutela della salute.
A. Blomberg Stathopoulos ..... pag. 367

Ruolo e potenzialità dei biocarburanti nel panorama energetico mondiale.
F. Reale ..... pag. 373

Road surface markings' performance: monitoring and innovation.
F. Asdrubali, C. Buratti, E. Moretti, F. D'Alessandro, S. Schiavoni ..... pag. 379

Caratterizzazione dell'illuminazione delle principali vie di Castiglione del Lago (PG) mediante simulazioni.
R. Mariani, M. Scoccia, N. Sisti ..... pag. 385

Ottimizzazione della logistica distributiva nella ZTL a Roma: ruolo degli attori e processo decisionale.
E. Valeri, A. Blomberg Stathopoulos, E. Marcucci, V. Gatta, L. Rotaris ..... pag. 391

Mobilità, sviluppo e sostenibilità nei contesti urbani.
G. Grea, A. Milotti ..... pag. 397

Premio "Mauro Felli 2008"

Albo d'Oro - Premio "Mauro Felli" ..... pag. 405

Indice Autori

SESSIONE

QUALITÀ DELL'AMBIENTE COSTRUITO E INQUINAMENTO INDOOR

ANALISI DEI PARAMETRI ANTROPOMETRICI DI ETNIE DIVERSE AI FINI DEL COMFORT TERMOIGROMETRICO INDOOR

V. Franzitta[1], F. P. Lo Curcio[1], A. Nucara[2], G. Scaccianoce[1], M. Tripodi[2]

[1]Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali, Università degli Studi di Palermo,
Viale delle Scienze ed.9 – 90128 Palermo,
[2]Dipartimento di Informatica, Matematica, Elettronica e Trasporti, Università Mediterranea di Reggio Calabria,
Via Graziella – Feo di Vito – 89122 Reggio Calabria

SOMMARIO

In questo lavoro vengono presentati i risultati di uno studio volto a verificare se l'algoritmo, proposto da P.O. Fanger, relativo allo scambio termico radiativo tra corpo umano ed ambiente indoor, possa essere utilizzato per tutte le popolazioni mondiali: un erronea stima dello scambio termico radiativo può condurre infatti ad una erronea valutazione delle prestazioni di comfort indoor. In queste condizioni risulta pertanto importante valutare, con elevata accuratezza, i parametri coinvolti nel calcolo del flusso termico radiativo tra corpo umano e ambiente indoor circostante, tra i quali ritroviamo quelli dipendenti dalle caratteristiche propriamente geometriche del corpo umano: area proiettata, area efficace e fattore d'area proiettata.

Ai fini di valutare tali parametri, si è scelto di utilizzare un metodo indiretto, ed in particolare quello fotografico semplice, che qui viene simulato utilizzando un software 3D per mezzo del quale sono stati costruiti alcuni modelli di corpo umano partendo da una base di dati antropometrici riferibili a più gruppi etnici; ciò attribuisce una rilevante peculiarità al presente studio rispetto ad altri studi analoghi riportati in letteratura che fanno uso di basi di dati limitate e riferite ad un solo gruppo etnico.

INTRODUZIONE

Nei Paesi industrializzati, una quota elevata dei consumi energetici finali è attribuibile al settore residenziale e terziario, e, in particolare, agli impianti di climatizzazione che servono a mantenere elevate condizioni di comfort all'interno degli ambienti interni.

La scelta degli strumenti di analisi da utilizzare nella valutazione delle prestazioni indoor degli edifici è pertanto di fondamentale importanza per lo sviluppo di opportune strategie per una migliore efficienza energetica e qualità indoor del sistema edificio.

Inoltre, la percezione delle condizioni termoigrometriche in un ambiente confinato viene sempre più spesso utilizzata per valutare in modo indiretto sia le proprietà fisico-tecniche dell'ambiente che l'efficacia con la quale gli impianti contribuiscono a mantenere al livello desiderato le condizioni di microclima all'interno dell'ambiente.

Al fine di pervenire a elevati livelli di efficienza e risparmio energetico nell'esercizio degli impianti, mantenendo elevati livelli di comfort, si sono affermate metodologie di analisi per l'individuazione delle prestazioni indoor degli edifici. Fra queste metodologie, quella che maggiormente si è andata diffondendo è quella proposta da Fanger [1], che consente di stabilire le condizioni di benessere termoigrometrico all'interno di ambienti moderati in funzione di parametri oggettivi e soggettivi.

Da una più attenta analisi sull'influenza che alcuni parametri esercitano sul comfort termoigrometrico all'interno di ambienti chiusi, si può asserire che la valutazione delle condizioni di benessere termico di un individuo non può essere effettuata senza una valutazione accurata del carico radiante cui esso è soggetto. A tale scopo è necessario valutare alcuni parametri quali l'area efficace e i fattori d'area proiettata, ricavabili da caratteristiche propriamente geometriche del corpo umano.

Nell'ambito del calcolo dei fattori di area proiettata e dei parametri che da essi derivano, in questo lavoro viene presentato uno studio volto ad individuare eventuali differenze nei parametri per soggetti appartenenti a differenti etnie.

La metodologia si basa su un confronto sistematico tra i fattori di area proiettata determinati attraverso un software di simulazione grafica 3D [2].

Lo studio è stato condotto avvalendosi di un esteso campione di dati antropometrici riferibili a più gruppi etnici [3]; ciò ha consentito di valutare l'influenza delle differenti caratteristiche antropometriche delle diverse popolazioni sul calcolo dei fattori d'area proiettata e, quindi, sul calcolo del flusso radiativo tra l'uomo e l'ambiente indoor circostante.

Studi analoghi riportati in letteratura, fanno invece generalmente riferimento a misure su un limitato numero di individui appartenenti ad un solo gruppo etnico [1, 4, 5].

CONDIZIONI TERMICHE NEGLI AMBIENTI CONFINATI

Nel processo di progettazione di un ambiente confinato si rende necessario analizzare i parametri che influenzano il microclima interno al fine di valutarne l'idoneità a ospitare persone con riferimento al comfort termoigrometrico.

La sensazione termica di un soggetto all'interno di un ambiente confinato è essenzialmente connessa all'esigenza di mantenere lo stato di omotermia del nucleo, in cui la produzione di calore metabolico eguaglia le dispersioni termiche che si verificano per respirazione ed attraverso la superficie della pelle.

Tale condizione può essere espressa dalla seguente

equazione di bilancio:

$$(M-W)-(C_{res}+E_{res}+C+R+E_d+E_{sw})=0 \quad (1)$$

in cui M è il metabolismo energetico, W la potenza meccanica, C_{res} ed E_{res} le potenze termiche disperse nella respirazione rispettivamente come calore sensibile e latente, C ed R le potenze termiche sensibili scambiate attraverso la pelle per convezione e radiazione, E_d ed E_{sw} le potenze termiche latenti scambiate attraverso la pelle per diffusione e per sudorazione.

Scambi termici sensibili

Dall'applicazione dell'Eq. (1) in tipiche condizioni termoigrometriche a cui possa essere sottoposto un soggetto all'interno di un ambiente confinato, emerge che i principali scambi termici avvengono per convezione e per irraggiamento che, complessivamente, contribuiscono a circa il 70% del carico termico; a causa del loro notevole peso nel determinare la sensazione termica dell'individuo tali termini necessitano pertanto di una particolare attenzione.

Essi possono essere espressi con le seguenti relazioni:

$$C = f_{cl} A_b h_c (t_{cl} - t_a) \quad (2)$$

$$R = \sigma \varepsilon f_r f_{cl} A_b \left[(t_{cl}+273)^4 - (\bar{t}_r+273)^4 \right] \quad (3)$$

con f_{cl} fattore d'area dell'abbigliamento, A_b area del corpo umano nudo, h_c coefficiente di scambio convettivo, t_{cl} temperatura media della superficie esterna del corpo umano abbigliato, t_a temperatura dell'aria, σ costante di Stefan-Boltzmann, ε emissività della superficie esterna della persona, f_r fattore d'area efficace, $\bar{t}_r$ temperatura media radiante.

Temperatura media radiante

Nella valutazione della componente radiativa è fondamentale determinare correttamente la temperatura media radiante, poiché essa risente della posizione del soggetto rispetto alle pareti dell'ambiente e della presenza di sorgenti radianti ad alta intensità, caratterizzate da piccola area, alta temperatura ed emissione radiante fortemente direzionale.

Nel caso più generale, la temperatura media radiante di un soggetto posto in un ambiente con N superfici isoterme ed in cui sono presenti M sorgenti radianti ad alta intensità è calcolabile attraverso la seguente equazione:

$$\bar{t}_r = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^{N} (t_{s,i}+273)^4 F_{P\to i} + \sum_{j=1}^{M} \frac{\alpha_{ir,j} q_{ir,j}}{\varepsilon \sigma} f_{p,j}} - 273 \quad (4)$$

con t_s temperatura superficiale, $F_{P\to i}$ fattore di vista tra soggetto e superficie isoterma, α_{ir} coefficiente di assorbimento della pelle alla temperatura della sorgente, q_{ir} flusso di densità radiante, f_p fattore di area proiettata.

Nella valutazione della sensazione termica, il calcolo della temperatura media radiante riveste un ruolo molto importante, perché consente di valutare la variabilità spaziale del campo radiante. Tale variabilità è determinata dai fattori di vista che, dipendendo dalla mutua posizione tra soggetto e pareti del locale, assumono valori differenti nei vari punti dell'ambiente.

Il generico fattore di vista tra un soggetto ed una parete rettangolare posta di fronte ad esso può essere determinato con la seguente relazione:

$$F_{P\to i} = \frac{1}{\pi} \int_{x/y=0}^{x/y=a/c} \int_{z/y=0}^{z/y=b/c} \frac{f_p}{\sqrt{\left[1+(x/y)^2+(z/y)^2\right]^3}} d(x/y)\, d(z/y) \quad (5)$$

in cui a, b e c sono grandezze geometriche che caratterizzano le dimensioni della superficie e la sua distanza dal soggetto.

Parametri geometrici del corpo umano

Come è possibile osservare nell'equazioni (2) e (3), per determinare gli scambi termici per radiazione e per convezione è necessario conoscere l'area del corpo umano nudo, il fattore d'area dell'abbigliamento, il fattore d'area efficace, nonché i fattori d'area proiettata. Questi parametri risultano anche necessari per la determinazione della temperatura media radiante e dei fattori di vista.

L'area del corpo umano nudo rappresenta la superficie esterna del corpo umano non abbigliato. Essa viene generalmente determinata in funzione dell'altezza, h, del soggetto e del suo peso, w, per mezzo della Formula di Du Bois [6]:

$$A_b = 0.20247\ h^{0.725} w^{0.425} \quad (6)$$

Il fattore d'area dell'abbigliamento è il rapporto tra l'area della superficie esterna del corpo umano abbigliato, A_{cl}, e l'area della superficie esterna del corpo nudo, A_b:

$$f_{cl} = \frac{A_{cl}}{A_b} \quad (7)$$

Nel caso di soggetto nudo si ha f_{cl}=1 ed A_{cl}=A_b.

Il fattore d'area efficace è il rapporto tra la più piccola area completamente convessa che racchiude il corpo umano abbigliato (area efficace del corpo umano, A_r) e l'area della superficie esterna del corpo umano abbigliato:

$$f_r = \frac{A_r}{A_{cl}} \quad (8)$$

Infine il fattore d'area proiettata in una direzione è definito come il rapporto tra l'area proiettata del corpo umano, A_p, e l'area efficace del corpo umano:

$$f_p = \frac{A_p}{A_r} \quad (9)$$

L'area proiettata, che dipende dalla direzione e quindi dagli angoli azimutale, α, e di altezza, β, è definita come la superficie del corpo umano, proiettata su un piano perpendicolare alla direzione della congiungente il baricentro del soggetto con la sorgente radiativa. Essa viene utilizzata anche per determinare l'area efficace del corpo umano mediante la seguente relazione:

$$A_r = \frac{4}{\pi} \int_{\alpha=0}^{\pi} \int_{\beta=0}^{\pi/2} A_p \cos\beta \, d\alpha \, d\beta \quad (10)$$

METODOLOGIA PER IL CALCOLO DELLE AREE PROIETTATE

Per poter pervenire ai fattori d'area proiettata è necessario determinare le aree proiettate per varie direzioni, nonché l'area efficace del soggetto.

Per procedere in tal senso si sono utilizzati in passato vari metodi: metodi fotografici semplici, con specchi fissi e mobili [1], metodi che acquisiscono immagini mediante fotocamere digitali [7], metodi che partono dalla creazione di un modello virtuale del soggetto [4].

In questo studio si è proceduto con un metodo indiretto, realizzando un modello tridimensionale del corpo umano mediante il software Poser® [2], che consente la costruzione di modelli digitali del corpo umano a partire da dati antropometrici.

Una volta creato il modello digitale del soggetto, con il medesimo software è stato possibile ricavare viste del soggetto da molteplici direzioni.

Dalle viste così ottenute sono stati prodotti dei file formato bitmap che sono stati successivamente elaborati al fine di massimizzare il contrasto tra la parte di immagine relativa al modello del soggetto rispetto alla parte di immagine relativa allo sfondo.

È stato inoltre realizzato un apposito foglio di calcolo Excel® al fine di determinare le aree proiettate a partire dal conteggio dei pixel che, per ogni immagine, potevano essere attribuiti al soggetto; a tal fine si è resa necessaria una fase di taratura per determinare il fattore di conversione da pixel a metri quadri.

L'intera procedura è riassunta in Figura 1.

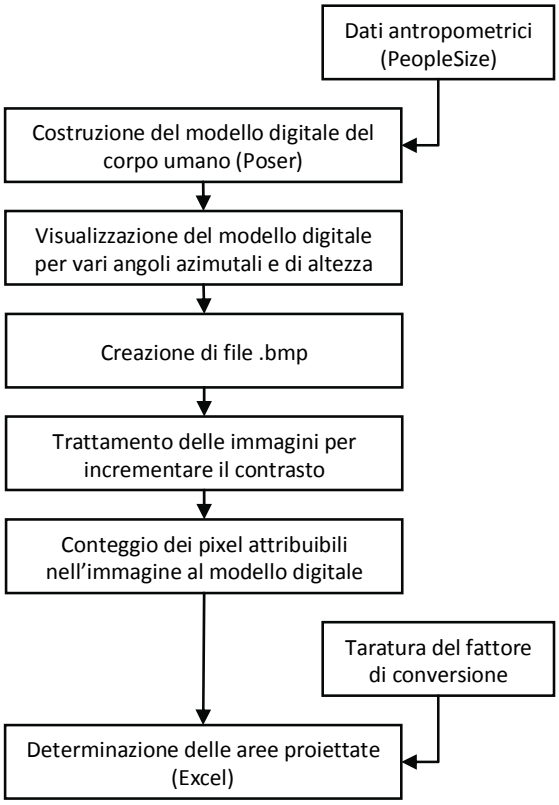


Figura 1: Diagramma di flusso della procedura utilizzata per la determinazione dei valori dell'area proiettata [8].

I metodi utilizzati in passato per la determinazione dei fattori d'area proiettata sono stati applicati ad un limitato campione di individui; in questo studio, con l'obiettivo di estendere l'analisi ad un elevato numero di individui e di evidenziare eventuali differenze tra soggetti appartenenti a gruppi etnici diversi, si è fatto riferimento ad un vasto database di dati antropometrici di differenti popolazioni.

In particolare, con riferimento alle principali grandezze antropometriche indicate nella UNI EN ISO 7250 [9], sono stati creati i modelli digitali tridimensionali dei soggetti maschili e femminili, in posizione eretta o seduta, appartenenti alle etnie Italiana, Australiana, Cinese, Giapponese, Tedesca e Statunitense (Tabella 1).

I dati antropometrici utilizzati, tratti dal database PeopleSize [3] e riferiti al 50° percentile, sono riportati in Tabella 2.

Tabella 1: Modelli digitali del corpo umano nudo in piedi.

Soggetti	Etnia: Italiana	Australiana	Cinese	Giapponese	Tedesca	Statunitense
Uomini						
Donne						

Tabella 2: Parametri antropometrici delle diverse etnie utilizzate per la costruzione dei modelli digitali (misure espresse in mm).

	Parametro antropometrico	**Etnia**					
		Italiana	**Australiana**	**Cinese**	**Giapponese**	**Tedesca**	**Statunitense**
Uomini	Statura	1714	1759	1686	1685	1771	1769
	Altezza della spalla	1405	1451	1388	1368	1463	1459
	Altezza del gomito	1082	1109	946	1061	1116	1115
	Altezza inguinale	834	818	784	790	824	826
	Altezza tibiale	454	468	432	430	475	475
	Larghezza bideltoide delle spalle	459	472	439	448	475	482
	Altezza del ginocchio	530	508	473	474	511	511
Donne	Statura	1590	1632	1569	1565	1655	1630
	Altezza della spalla	1304	1339	1275	1278	1358	1337
	Altezza del gomito	1000	1028	1027	987	1043	1027
	Altezza inguinale	757	744	723	700	755	743
	Altezza tibiale	431	431	395	395	437	430
	Larghezza bideltoide delle spalle	406	449	394	411	448	457
	Altezza del ginocchio	483	471	460	458	478	470

Per ognuno dei 24 modelli digitali creati sono state quindi acquisite le immagini facendo variare, con passo 5°, l'angolo azimutale da 0° a 180° e l'angolo di altezza da 0° a 90°; si sono pertanto ottenute 16008 immagini, 667 per ogni soggetto.

Note le aree proiettate, sono state infine calcolate le aree efficaci risolvendo numericamente l'Eq. (10) ed i fattori d'area proiettata con l'Eq. (9).

CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI PER LE DIVERSE ETNIE

Una volta calcolati i fattori d'area proiettata, le aree efficaci ed i fattori d'area efficace dei 24 modelli digitali, si è proceduto al loro confronto.

Fattori d'area proiettata

Nelle Figure 2 e 3, che si riferiscono a soggetti di sesso maschile rispettivamente in postura eretta e in postura seduta, vengono rappresentati in ordinata i valori dei fattori d'area proiettata delle diverse etnie, confrontandoli con i valori ottenuti per i soggetti italiani, assunti come riferimento e riportati in ascissa.

Come si può notare non si evidenzia una significativa dipendenza del fattore d'area proiettata con l'etnia; un risultato analogo si ricava anche per i soggetti di sesso femminile.

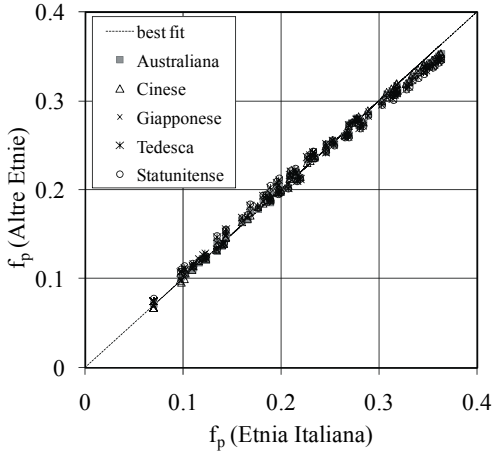


Figura 2: Fattori di area proiettata per soggetti di diversa nazionalità per postura eretta (soggetto maschile).

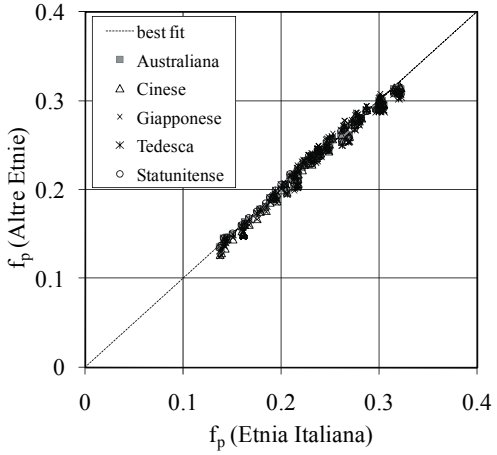


Figura 3: Fattori di area proiettata per soggetti di diversa nazionalità per postura seduta (soggetto maschile).

Aree efficaci e fattori d'area efficace

Per quanto attiene al confronto tra le aree efficaci, si può notare che i valori ottenuti sono strettamente legati all'altezza media della popolazione; i valori più alti si registrano infatti per le etnie Tedesca e Statunitense e quelli più bassi per le etnie Cinesi e Giapponesi. I valori dei fattori d'area efficace sono invece molto prossimi fra loro per tutte le etnie analizzate.

Il dettaglio dei risultati ottenuti è riportato nelle Tabelle 3 e 4, rispettivamente per soggetti di sesso maschile e femminile.

Tabella 3: Area efficace e fattore di area efficace: uomini in posizione eretta e seduta.

Etnia	Soggetto eretto		Soggetto seduto	
	A_r [m^2]	f_r	A_r [m^2]	f_r
Australiana	1.388	0.771	1.326	0.737
Italiano	1.253	0.784	1.196	0.748
Cinese	1.210	0.790	1.153	0.752
Giapponese	1.197	0.788	1.145	0.753
Tedesco	1.449	0.777	1.361	0.730
Statunitense	1.460	0.774	1.381	0.732

Tabella 4: Area efficace e fattore di area efficace: donne in posizione eretta e seduta.

Etnia	Soggetto eretto		Soggetto seduto	
	A_r [m^2]	f_r	A_r [m^2]	f_r
Australiana	1.254	0.802	1.181	0.756
Italiana	1.107	0.810	1.020	0.747
Cinese	1.074	0.824	0.991	0.760
Giapponese	1.082	0.822	1.013	0.769
Tedesca	1.263	0.809	1.168	0.748
Statunitense	1.261	0.794	1.182	0.744

CONFRONTO CON I DATI RIPORTATI IN LETTERATURA

I valori dei fattori di area proiettata ottenuti nel presente studio per un soggetto italiano sono stati confrontati con quelli ricavati da P.O. Fanger [1]; tale confronto assume una notevole rilevanza poiché i fattori di area proiettata calcolati da Fanger sono stati utilizzati per determinare i diagrammi dei fattori di vista riportati nella normativa UNI EN ISO 7726 [10].

Sono stati inoltre confrontati i valori medi delle aree efficaci e dei fattori di area efficace ricavati nel presente lavoro con quelli determinati in passato in analoghi studi.

Fattori di area proiettata

Il confronto tra i valori dei fattori di area proiettata ottenuti nello studio per soggetti maschi italiani e quelli trovati da Fanger è riportato nelle Figure 4 e 5, rispettivamente per soggetti in piedi e seduti. È possibile notare un sostanziale accordo per quanto concerne i soggetti in postura eretta, mentre è evidente la presenza di qualche discordanza per i soggetti in postura seduta.

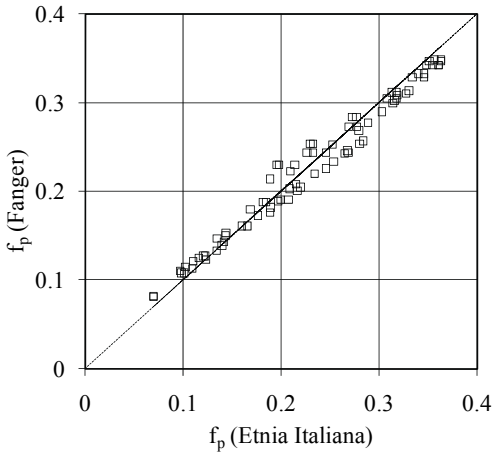


Figura 4: Fattori di area proiettata per postura eretta del soggetto maschile italiano (presente studio) e di Fanger.

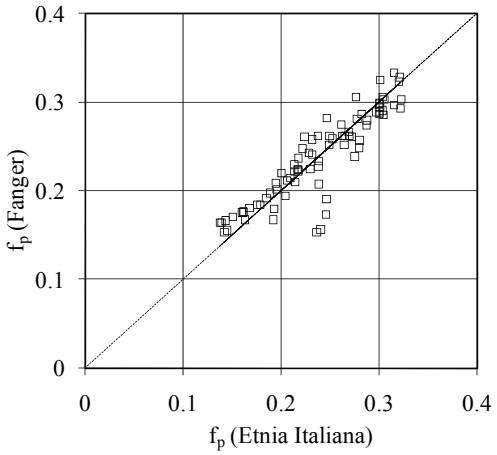


Figura 5: Fattori di area proiettata per postura seduta del soggetto maschile italiano (presente studio) e di Fanger.

Da un dettagliato esame dei dati ottenuti per i soggetti seduti emergono infatti, per un angolo di altezza pari a 30°, differenze apprezzabili nei fattori d'area proiettata per valori dell'angolo azimutale superiori a 90°. È importante sottolineare che tali differenze, evidenziate nella Figura 6, erano già emerse in altri due studi dovuti a Calvino et al. [11] e Tanabe et al. [4].

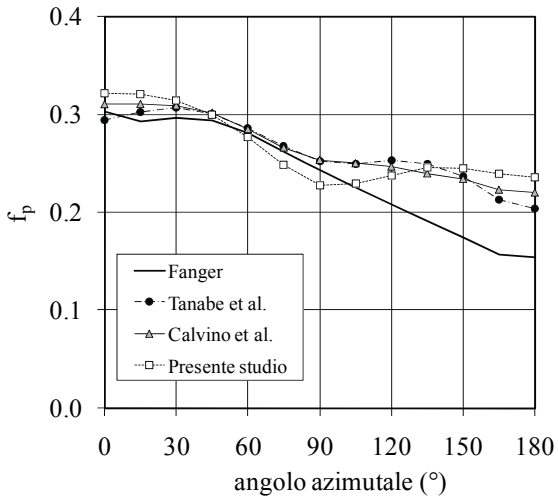


Figura 6: Fattori di area proiettata per postura seduta ed angolo di altezza 30° ottenuti in differenti studi.

Aree efficaci e fattori d'area efficace

Nella Tabella 5 si riportano, per soggetti eretti e seduti, i valori dell'area efficace e del fattore di area efficace ricavati in precedenti studi di letteratura ed i valori medi per le diverse etnie ottenuti nel presente studio, per uomini, donne e per entrambi.

Dal confronto si evince che i valori di area efficace e del fattore di area efficace determinati con la metodologia in precedenza descritta sono in buon accordo con quelli presenti in letteratura, soprattutto per la postura eretta.

Tabella 5: Area efficace e fattore di area efficace per soggetti in posizione eretta e seduta (letteratura).

Modelli	**Soggetto eretto**		**Soggetto seduto**	
	A_r [m^2]	f_r	A_r [m^2]	f_r
Letteratura				
Fanger [1]	1.262	0.725	1.211	0.696
Tanabe et al. [4]	1.276	0.744	1.176	0.691
Horikoshi et al. [5]	1.312	0.803	1.214	0.740
Calvino et al. [7]	1.424	0.806	1.300	0.735
Miyazaki et al [12]	1.317	0.834	1.224	0.775
Presente studio				
Uomini	1.326	0.781	1.260	0.742
Donne	1.174	0.810	1.093	0.754
Uomini e donne	1.250	0.795	1.176	0.748

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata presentata una metodologia che ha consentito la determinazione delle area proiettate, delle aree efficaci e dei fattori d'area proiettata di soggetti appartenenti a differenti etnie.

Tramite l'ausilio di un software di grafica 3D, sono stati realizzati 24 modelli virtuali del corpo umano differenziati per etnia, postura, e sesso. Sono stati quindi determinati i parametri d'area del corpo umano dei modelli virtuali, simulando un metodo fotografico semplice, sempre con l'ausilio dello stesso software. Infine, i dati ottenuti sono stati tra loro confrontati al fine di evidenziare eventuali differenze.

Dall'analisi dei risultati è emerso che non vi sono significative discordanze nei valori dei fattori d'area proiettata e dei fattori d'area efficace al variare dell'etnia e del sesso, mentre si nota una dipendenza dei valori delle aree efficaci con l'altezza media della popolazione.

Dal confronto tra i valori dei fattori di area proiettata ottenuti nello studio per soggetti maschi italiani e quelli trovati in passato in un analogo studio da Fanger è emerso un sostanziale accordo per quanto concerne i soggetti in postura eretta, ma anche la presenza di qualche discordanza per i soggetti in postura seduta.

Si evidenzia infine un buon accordo tra i valori medi delle aree efficaci e dei fattori di area efficace ricavati nel presente lavoro e quelli presenti in letteratura, soprattutto per la postura eretta.

NOMENCLATURA

Simbolo	Descrizione	u.m.
a, b, c	grandezze geometriche	m
A_b	area della superficie esterna del corpo nudo	m^2
A_{cl}	area della superficie esterna del corpo abbigliato	m^2
A_p	area proiettata del corpo umano	m^2
A_r	area efficace del corpo umano	m^2
C	scambio sensibile convettivo	W
C_{res}	scambio sensibile per respirazione	W
E_d	scambio latente per diffusione	W
E_{res}	scambio latente per respirazione	W
E_{sw}	scambio latente per sudorazione	W
f_{cl}	fattore d'area dell'abbigliamento	-
f_p	fattore d'area proiettata	-
f_r	fattore d'area efficace	-
$F_{P\rightarrow i}$	fattore di vista tra soggetto e superficie	-
h	altezza del soggetto	m
h_c	coefficiente di scambio termico convettivo	$Wm^{-2}°C^{-1}$
M	metabolismo energetico	W
q_{ir}	intensità di radiazione	$W\ m^{-2}$
R	scambio sensibile radiativo	W
t_a	temperatura dell'aria	°C
t_{cl}	temperatura media della superficie esterna del corpo umano abbigliato	°C
t_r	temperatura media radiante	°C
t_s	temperatura superficiale	°C
W	potenza meccanica	W
w	peso del soggetto	kg
ε	emissività della superficie esterna della persona	-
σ	costante di Stefan-Boltzmann	$Wm^{-2}K^{-4}$
α	angolo azimutale	°
α_{ir}	coefficiente di assorbimento della pelle	-
β	angolo di altezza	°

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. P.O. Fanger, Thermal Comfort, Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark, 1970.
2. POSER 8, 3D computer graphics, Smith Micro Software, my.smithmicro.com, 2009
3. OpenErgonomics, PeopleSize anthropometry software, www.openerg.com, 2009.
4. S. Tanabe, C. Narita, Y. Ozeki, M. Konishi, Effective radiation area of human body calculated by a numerical simulation, *Energy and Buildings*, Vol. 32, pp. 205-215, 2000.
5. T. Horikoshi, T. Tsucjikawa, Y. Kobayashi, E. Miwa, Y. Kurazumi, K. Hirayama, The effective radiation area and angle factor between man and rectangular plane near him (Part II). *ASHRAE Transactions, 96*, 60-66, 1990.
6. D. Dubois, E. F. Dubois, A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known, *Archives of Internal Medicine*, Vol. 17, pp 863–871, Chicago, 1916.
7. F. Calvino, M. La Gennusa, A. Nucara, G. Rizzo, G. Scaccianoce, Evaluating human body area factors from digital images: A measurement tool for a better evaluation of the ergonomics of working places, *Occupational Ergonomics,* Vol.5, pp 173-185, 2005.
8. F.P. Lo Curcio, Scambi termici tra corpo umano ed ambiente indoor: verifica della validità degli algoritmi per il calcolo del fattore di area proiettata, Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e Territorio, Università di Palermo, Relatore G. Scaccianoce, 2009.
9. UNI EN ISO 7250, Misurazioni di base del corpo umano per la progettazione tecnologica, Ente Italiano per l'Unificazione, Milano, 2000.
10. UNI EN ISO 7726, Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche, Ente Italiano per l'Unificazione, Milano, 2002.
11. F. Calvino, M. La Gennusa, G. Rizzo, G. Scaccianoce, Measurements of projected areas of seated and standing people of southern Italy based on a statistical analysis, *Applied Ergonomics,* Vol.40, pp 239-250, 2009.
12. Y. Miyazaki, M. Saito, Y. Seshimo, A study of evaluation of non-uniform environments by human body model, *Journal of Human and Living Environment*, Vol. 2(1), pp 92-100, 1995.

MODELLAZIONE NUMERICA E VALIDAZIONE SPERIMENTALE DELLA GENERAZIONE E DEL TRASPORTO DI RADON ALL'INTERNO DI QUATTRO EDIFICI COLLOCATI IN DIVERSE LOCALITÀ DEL VENETO

Giacomo Villi[1], Michele De Carli[1], Carlo Bigliotto[2], Andrea Bertolo[2]

[1] Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Fisica Tecnica, via Venezia 1, Padova
[2] ARPA Veneto – Dipartimento di Padova - via Ospedale 22, Padova

SOMMARIO

Questo lavoro descrive l'impiego della tecnica di modellazione multi-zona applicata alla previsione delle concentrazioni di radon all'interno di quattro edifici collocati in diverse località del Veneto. I casi esaminati comprendono una scuola collocata in provincia di Belluno e tre edifici ad uso residenziale siti nella zona collinare euganea.

Il lavoro descrive le varie fasi nelle quali è stato articolato il modello di calcolo utilizzato nello studio: ipotesi circa il meccanismo di infiltrazione del gas, descrizione del termine sorgente responsabile della generazione indoor di radon e caratterizzazione dei fenomeni di ventilazione naturale, con particolare rilievo dedicato agli scambi di massa attraverso l'involucro edilizio. L'obiettivo della modellazione è stato quello di riuscire a riprodurre l'evoluzione temporale delle concentrazioni di radon, dati i fenomeni di infiltrazione e trasporto del gas.

I risultati ottenuti dalla simulazioni sono stati confrontati con i dati sperimentali resi disponibili dalla campagna regionale di monitoraggio radon condotta da ARPAV. Il lavoro ha inoltre riguardato un nuovo caso di studio per il quale la misura di radon è stata affiancata alla prova sperimentale del *blower door test*. Il buon riscontro ottenuto dimostra l'applicabilità della modellazione multi-zona al problema della previsione delle concentrazioni di radon all'interno di ambienti confinati.

INTRODUZIONE

L'indagine nazionale sulle concentrazioni di radon all'interno delle abitazioni, condotta dall'Istituto Superiore di Sanità e dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici negli anni compresi tra il 1989-1997 [1], si è conclusa con la rilevazione di una concentrazione media di 70 Bq m^{-3}. Recentemente, più Regioni hanno intrapreso diverse iniziative per affinare la conoscenza dei livelli di concentrazione di radon presenti nel territorio di pertinenza. Per il Veneto, la costituzione di una mappa del territorio con in evidenza le zone a maggior rischio ha permesso di individuare, per le zone centrali e settentrionali della Regione, una concentrazione media di 94 Bq m^{-3}. Inoltre, le aree ad alto potenziale, corrispondenti alle zone di territorio in cui il valore di riferimento di 200 Bq m^{-3} viene superato nel 10% delle abitazioni, si estendono fino ad occupare circa un decimo del territorio regionale [2].

La presenza del radon nelle abitazioni dipende principalmente dal tipo del suolo sul quale è costruito l'edificio e dai materiali da costruzione utilizzati. I flussi d'aria che avvengono tra ambiente interno ed esterno, così come gli scambi di massa tra i vari locali di un edificio, incidono profondamente sui livelli di concentrazione indoor di radon. Tali flussi avvengono naturalmente a seguito del campo di pressioni indotto dall'azione del vento e del sussistere di un gradiente di densità causato da una differenza di temperatura, piuttosto che essere determinati dalla presenza di un sistema di ventilazione meccanica.

Il presente lavoro intende descrivere l'applicazione del metodo di calcolo multi-zona alla modellazione dell'infiltrazione e del trasporto del radon all'interno di quattro edifici campione, prescelti in base alla disponibilità di dati sperimentali rispetto ai quali è stata quindi possibile la validazione dei risultati ottenuti dalle simulazioni. Gli edifici considerati nel presente studio sono stati individuati da ARPAV a seguito delle elevate concentrazioni riscontrate. Successivamente, in collaborazione con il Dipartimento di Costruzione dell'Istituto di Architettura di Venezia, sono state adottate le relative tecniche di mitigazione che hanno consentito di realizzare le specifiche bonifiche [3]. Il primo edificio in esame, cui ci riferirà nel seguito con "CASO 1", ha riguardato una scuola sita in località Alleghe (BL). Tale edificio è stato, in contemporanea con altre scuole, monitorato e successivamente bonificato da ARPAV nel corso del piano regionale radon del 2006. Il secondo caso preso in esame ("CASO 2") ha trattato un'abitazione situata all'interno del Parco Regionale dei Colli Euganei nel territorio comunale di Galzignano Terme (PD). Si tratta di un'abitazione monofamiliare, monitorata e successivamente bonificata da ARPAV su richiesta del Proprietario. Il terzo caso esaminato ("CASO 3") ha riguardato un'abitazione monofamiliare, situata nel comune di Cinto Euganeo (PD). Anche questa abitazione, come la precedente, è stata monitorata dal personale ARPAV a seguito dell'iniziativa del Proprietario. L'ultimo caso trattato ("CASO 4") fa riferimento ad un'abitazione monofamiliare situata a Faedo, frazione del comune di Cinto Euganeo (PD). Quest'ultimo caso ha coinciso con il periodo di monitoraggio più esteso (26 Giugno – 20 Agosto). Tale caso ha potuto avvalersi della caratterizzazione più dettagliata degli scambi di massa che avvengono attraverso l'involucro edilizio, avendo integrato il modello di calcolo proposto con la prova sperimentale detta *blower door test*.

MODELLO DI CALCOLO

Il radon (Rn) è un gas inerte radioattivo generato dal

decadimento del radio presente, in quantità variabile a seconda della geologia del terreno, nel suolo o nei materiali da costruzione che derivano in particolare da rocce magmatiche (come, ad esempio, il tufo). Suolo e materiali da costruzione sono ritenuti essere i principali responsabili della presenza di radon all'interno degli ambienti confinati, anche se per alcuni casi particolari, sia stato riconosciuto il ruolo dovuto ad acqua e gas naturale [4]. Benché il radon sia un gas nobile, essendo quindi chimicamente inerte ed elettricamente neutro, costituisce tuttavia un elemento radioattivo, cui sono associati un processo di decadimento ed una corrispondente emissione di radiazioni. Gli isotopi radioattivi del radon sono tre: ^{219}Rn, ^{220}Rn e ^{222}Rn. In termini di possibili effetti sanitari, solo quest'ultimo costituisce un pericolo, dato che i primi due hanno tempi di dimezzamento così brevi (rispettivamente, 3.92 s e 55 s) tali da poter ritenere che questi decadano in prossimità del luogo di formazione. Il radionuclide ^{222}Rn ha invece un tempo di decadimento pari a 3.8 giorni che ne rende possibile la migrazione attraverso le porosità del suolo e la successiva dispersione nell'aria ambiente. All'aperto, la concentrazione di radon non raggiunge mai livelli elevati, ma l'accumulo all'interno degli ambienti confinati può raggiungere concentrazioni tali da rappresentare un rischio significativo per la salute delle persone esposte. La pericolosità del radon è legata alle radiazioni ionizzanti di tipo alfa associate al decadimento dell'isotopo stesso e dei suoi discendenti (due isotopi del polonio (Po), ^{218}Po e ^{214}Po rispettivamente). L'infiltrazione del radon all'interno degli ambienti indoor avviene secondo i due meccanismi fondamentali del trasporto: diffusione e trasporto associato alla direzione di un flusso (avvezione). Il primo meccanismo dipende dall'esistenza di un gradiente di concentrazione e risulta nel moto da regioni a concentrazioni maggiori (la concentrazione del radon nelle porosità del suolo assume valori dell'ordine dei 20 – 100 kBq m^{-3}, di tre ordini di grandezza superiore alle comuni concentrazioni indoor) a regioni dove la concentrazione è più bassa. Si ritiene inoltre che il meccanismo della diffusione costituisca il mezzo principale legato all'emissione di radon da parte dei materiali da costruzione. Il trasporto associato al fenomeno dell'avvezione vede il radon penetrare negli edifici secondo un flusso proporzionale alla differenza di pressione tra interno ed esterno. Tale differenza di pressione risulta dal sussistere di una differenza di temperatura, piuttosto che dall'azione del vento incidente sulle facciate dell'edificio o dalla presenza di un sistema di ventilazione meccanica. Data una forza promotrice il movimento del gas (gradiente di concentrazione o differenza di pressione), il radon penetra nell'edificio attraverso qualsiasi apertura di dimensioni non inferiori a quelle di un suo atomo (fessurazioni dell'involucro edilizio, giunti di connessione, passaggi degli impianti elettrico, termico o idraulico presenti nell'attacco a terra, porosità dei materiali da costruzione). L'influenza delle varie modalità di contribuzione alle concentrazioni risultanti indoor è dibattuta. La Tabella 1 propone un riassunto dell'elenco presente in [5]; si notino le differenze tra le entità del trasporto per avvezione attraverso il terreno rispetto ai processi diffusivi che avvengono nei materiali da costruzione e nel suolo.

Tabella 1: Valori di riferimento per il contributo alle concentrazioni interne di radon, distinti in base alla sorgente, al rispettivo meccanismo di trasporto ed al particolare materiale. Gli apici "1" e "2" fanno riferimento ad analisi eseguita con finestre dell'interrato rispettivamente aperte o chiuse. Il contributo dovuto ai materiali da costruzione va riferito ad una superficie unitaria.

Fonte	Sorgente	Bq s^{-1}
Cavallo *et al.* (1992)	Suolo Avvezione	(56-83)^1 (347-458)^2
Cavallo *et al.* (1994)	Suolo Avvezione	606^1 (4306)^2
Robinson e Sextro (1995)	Suolo Avvezione	0-0.8 (Bq s^{-1} Pa^{-1})
Ward *et al.* (1993)	Suolo Avvezione	0-0.43
Hintenlang e Al-Ahmady (1992)	Suolo Diffusione	6.8
Tsang e Narashiman (1992)	Suolo Diffusione	0.011-0.167
Stranden (1988)	Materiali da costruzione Cemento	(5.6-83)×10^{-4}
Stranden (1988)	Materiali da costruzione Laterizio	(5.6-14)×10^{-4}
Chen *et al.* (1993)	Materiali da costruzione Marmo	(0.06-0.1)×10^{-4}
Tso *et al.* (1994)	Materiali da costruzione Laterizio	(2-3)×10^{-3}

Il modello elaborato nel presente lavoro ha voluto tenere conto del solo meccanismo dovuto all'avvezione. Diversi Autori oltre a quelli riportati [6, 7] riferiscono, infatti, come il processo diffusivo sia meno influente in termini di concentrazioni indoor risultanti, risultando invece predominate l'effetto del sussistere di una differenza di pressione tra ambiente interno ed esterno, soprattutto nel caso di elevati tassi di infiltrazione del gas. L'infiltrazione (G, [Bq s^{-1}]) di radon all'interno dei vari locali aventi almeno una superficie contro terra è stata quindi impostata secondo l'espressione (Eq. (1)) che segue:

$$G = S \times \Delta p \times \beta \tag{1}$$

dove Δp indica la differenza di pressione [Pa] tra il locale in questione ed esterno, mentre β è un coefficiente che rispetta le seguenti condizioni (Eq. (2)):

$$\beta = \begin{cases} 0 \; se \; \Delta p > 0 \\ 1 \; se \; \Delta p < 0 \end{cases} \tag{2}$$

Il termine sorgente S [Bq s^{-1} Pa^{-1}] è stato ricavato nel modo che segue. Dati i profili di concentrazioni (C, [Bq m^{-3}]) in funzione del tempo ottenuti in base alle misure eseguite, è stato calcolato il termine (Eq. (3)):

$$\Delta C = \frac{\left(C(t+\Delta t) - C(t)\right)}{\Delta t} \tag{3}$$

dove Δt indica l'intervallo di tempo [s] tra due campionamenti successivi. Il valore ottenuto è stato quindi moltiplicato per il volume [m^3] del locale monitorato. Grazie all'utilizzo della tecnica di modellazione multi-zona, che verrà descritta nel paragrafo seguente, è stato possibile ottenere informazioni come quelle illustrate in Figura 1. È stato cioè possibile ricavare l'andamento nel tempo delle pressioni relative all'interno dei locali dei vari edifici esaminati.

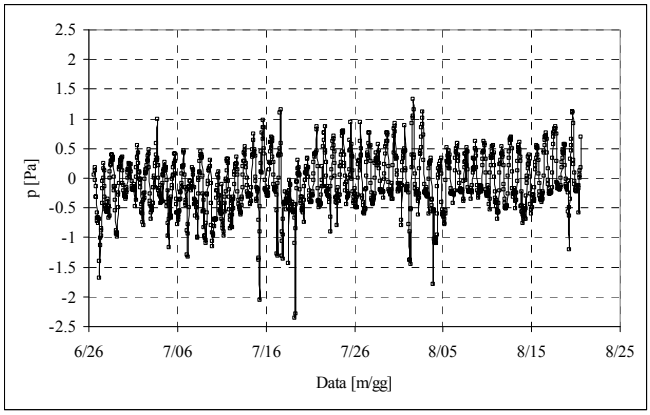


Figura 1: Grafico illustrativo della variabilità della differenza di pressione tra interno ed esterno per uno dei casi considerati nel presente studio. Gli scostamenti si riferiscono al valore atmosferico

Il termine sorgente S utilizzato nelle simulazioni è stato calcolato quindi in base alla relazione (Eq. (4)):

$$S = \frac{\overline{\Delta C}_i \left(con\ \Delta C_i > 0\right)}{\overline{\Delta p}_i \left(con\ \Delta p_i < 0\right)} \tag{4}$$

Con riferimento all'intero periodo di simulazione e per tutti i casi considerati nell'analisi, il termine S è il risultato del rapporto tra il valore medio dei rapporti incrementali valutati secondo Eq. (3), se questi fossero risultati positivi, e del valore medio delle differenze di pressione interno – esterno, se queste fossero risultate negative.

La tecnica di modellazione multi-zona

CONTAM è un programma multi-zona dedicato allo studio dei problemi legati alla ventilazione e all'analisi della qualità ambientale interna [8]. I codici di calcolo multi-zona si basano sulla modellazione dell'edificio in analisi secondo un circuito elettrico formato da nodi, che rappresentano le zone in cui è stato suddiviso, e da rami, che invece rappresentano gli elementi attraverso i quali i nodi interagiscono tra loro e che corrispondono ai dispositivi (porte, finestre, eventuali terminali di un impianto di ventilazione meccanica) attraverso i quali può avvenire il passaggio dell'aria. Ogni zona corrisponde ad una porzione omogenea di fluido in termini di pressione, temperatura e concentrazione di inquinanti. Benché questo tipo di modello non sia in grado di fornire informazioni locali, come, ad esempio, la distribuzione delle velocità in una determinata regione, la semplicità dell'algoritmo di calcolo fa sì che i tempi di simulazione e le risorse computazionali richieste risultino contenuti.

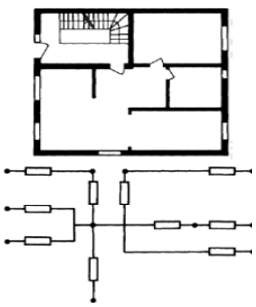


Figura 2 : Vista in pianta di una porzione di edificio e relativa modellazione multi-zona [9]

La portata d'aria che attraversa ogni dispositivo è univocamente determinata una volta che siano note le pressioni ai due capi dell'elemento e che questo sia stato caratterizzato in base ad un'opportuna relazione pressione-portata secondo l'espressione (Eq. (5)):

$$\dot{m} = C \cdot \Delta p^n \tag{5}$$

dove C è detto coefficiente di flusso mentre n indica l'esponente di flusso, con la convenzione che $n = 0.5$ nel caso di flusso turbolento ed $n = 1$ nel caso di flusso laminare.

Dato un qualunque dispositivo di flusso che metta in comunicazione le zone i-esima e j-esima, la differenza di pressione disponibile (Δp) viene calcolata secondo l'espressione che segue (Eq. (6)):

$$\Delta p_{i-j} = p_i + \rho_i g z_i - \left(p_j + \rho_j g z_j\right) + p_w \tag{6}$$

dove p_i e p_j indicano rispettivamente le pressioni di riferimento delle due zone [Pa], g è l'accelerazione di gravità, ρ_i e ρ_j rappresentano le rispettive densità dell'aria [kg m^{-3}] mentre z_i e z_j sono le altezze [m] del dispositivo in questione in riferimento alle due zone. L'eventuale contributo del vento viene conteggiato nel termine p_w [Pa].

La soluzione del circuito assemblato, ottenuta imponendo la conservazione della massa in corrispondenza di ciascun nodo, permette di ricavare la distribuzione delle pressioni all'interno dell'edificio analizzato, rendendo quindi disponibili le portate d'aria circolanti. La concentrazione di inquinanti all'interno di ciascuna zona viene quindi ricavata in base ad un bilancio tra le portate entranti ed uscenti e ad un'eventuale generazione interna. Nel modello di calcolo si è inoltre tenuto conto del processo di decadimento del radon in base al rispettivo tempo di dimezzamento. Il modello di calcolo è stato caratterizzato in base ad informazioni proprie dell'edificio in esame (metrature e volumi dei vari locali presenti, caratteristiche dell'involucro edilizio) e ad informazioni (temperatura, velocità e direzione del vento) che definissero il clima esterno. Le prime sono state utilizzate per la suddivisone in zone, per l'individuazione dei vari dispositivi di flusso e per la definizione delle relazioni pressione-portata associate ad ogni dispositivo (si è tenuto cioè conto della diversa natura del flusso che avviene attraverso una porta aperta piuttosto che quella che ha luogo attraverso una fessurazione dell'involucro). Le seconde sono state invece utilizzate per riprodurre l'interazione tra ambiente esterno ed edificio.

Modellazione della permeabilità dell'involucro edilizio

L'edificio in esame deve essere scomposto in una serie di zone collegate reciprocamente dai dispositivi attraverso i quali può avvenire lo scambio reciproco di massa. La modellazione dei flussi d'aria fluenti tra le varie zone e tra queste e l'ambiente esterno ha richiesto la caratterizzazione dell'involucro edilizio in termini di permeabilità all'aria. Laddove la gestione di aperture intenzionali come porte e finestre risultava chiara dall'andamento delle concentrazioni registrate, i casi di studio esaminati presentavano come incognita il tasso di infiltrazione (proporzionale al livello di permeabilità dell'involucro). Attraverso l'involucro dell'edificio avvengono infatti scambi di aria, volontari e non, tra esterno ed interno; l'aria entra attraverso i punti di giunzione dei componenti dell'involucro, attraverso i fori per il passaggio dei cavi elettrici, delle condutture per l'acqua e il

gas e dei condotti di ventilazione. La permeabilità dell'involucro edilizio può essere espressa da appositi indici. Nell'analisi condotta, sono stati impiegati i seguenti:

a) Portata d'aria e ricambio orario data una differenza di pressione indotta di 50 Pa tra l'interno e l'esterno dell'edificio (rispettivamente Q_{50} [m^3 h^{-1}]ed n_{50} [h^{-1}]);
b) Area d'infiltrazione effettiva (*Effective Leakage Area – ELA,* [cm^2]).

Data la portata d'aria corrispondente al sussistere di una differenza di pressione di 50 Pa, se si divide questa per il volume dell'edificio, si ottiene n_{50}, ossia il tasso di rinnovo corrispondente. L'area d'infiltrazione effettiva indica l'area di un foro dal contorno interno profilato a boccaglio cui corrisponde una portata di aria equivalente a quella che attraversa l'involucro dell'edificio data una differenza di pressione di 4 Pa. Con riferimento ai casi esaminati, si è proceduto nel modo che segue. Per i casi riguardanti edifici che erano già stati oggetto di studio da parte di ARPAV ("CASO 1", "CASO 2" e "CASO 3"), è stata ipotizzata una permeabilità totale dell'involucro basandola su di un valore dei ricambi d'aria orari (n_{50}) ricavato da [10] prendendo a riferimento la classe di permeabilità "media". Ciò è corrisposto ad assegnare ai modelli di calcolo un'area di infiltrazione effettiva corrispondente ad un indice n_{50} compreso tra 4 h^{-1} e 10 h^{-1} per le due abitazioni unifamiliari esaminate (n_{50} = 6.5 h^{-1} e n_{50} = 4.7 h^{-1} per "CASO 2" e "CASO 3" rispettivamente) e tra 2 h^{-1}e 5 h^{-1} per la scuola oggetto di "CASO 1" (n_{50} = 2.6 h^{-1}). Per l'edificio cui fa riferimento "CASO 4" si è proceduti alla misura sperimentale dell'ermeticità dell'involucro edilizio attraverso lo strumento del *blower door test*. Tale prova consiste nella generazione meccanica di una differenza di pressione tra interno ed esterno e si conclude con la determinazione della curva che esprime la permeabilità all'aria dell'edificio (Figura 3). Durante l'esecuzione del test, è possibile ispezionare l'intera superficie dell'involucro edilizio alla ricerca dei punti responsabili delle maggiori perdite per infiltrazione. In questo modo, è stato possibile classificare in ordine di importanza i vari elementi che maggiormente influenzano le infiltrazioni d'aria esterna, in modo che di essi si potesse opportunamente tener conto all'interno del modello di calcolo.

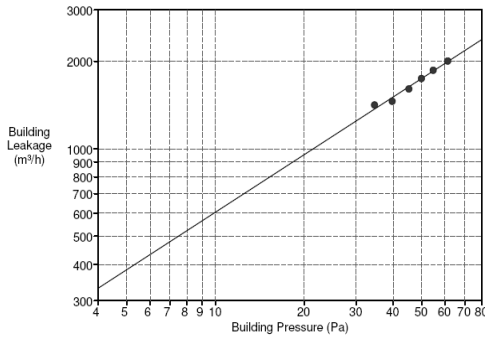


Figura 3 : Permeabilità all'aria dell'edificio corrispondente al "CASO 4". Ogni punto corrisponde ad una coppia di valori pressione generata – portata corrispondente

Nota la permeabilità totale dell'edificio, è stato possibile esprimere questa in termini di area d'infiltrazione effettiva. Nel caso in esame, la prova sperimentale sì è conclusa con la rilevazione di un'area di infiltrazione di 356 cm^2 e di 428 cm^2, con riferimento rispettivamente alla depressurizzazione ed alla pressurizzazione dell'edificio oggetto dell'analisi. Il modello di calcolo ha avuto assegnata un'area di infiltrazione pari alla media tra i due valori riportati. Per verificare la bontà del modello stesso si è inoltre provato a ricreare i vari locali e l'ambiente esterno una differenza di pressione di 50 Pa per confrontare la portata richiesta nella simulazione con quella necessaria durante l'esecuzione del *blower door test*. Il confronto si è chiuso con uno scostamento del 7% (modello di calcolo: 1879 m^3 h^{-1}; *blower door test*: 1755 m^3 h^{-1}).

RISULTATI

Questa Sezione riporta i risultati dell'applicazione della metodologia sviluppata ai vari casi presi in esame. Il modello elaborato si è dimostrato in grado di riprodurre, qualitativamente, l'andamento temporale delle reali concentrazioni di radon all'interno degli ambienti monitorati. Laddove nelle prime tre tra le applicazioni riportate, il buon accordo risulti da un'opportuna taratura del modello, è particolarmente significativo come tale accordo si mantenga anche nel caso di scenario non perturbato ("CASO 4").

Caso 1

Il modello si sviluppa su tre piani (Interrato, Piano Terra e Primo Piano). Il monitoraggio è stato condotto attraverso la misura in continuo di radon in due locali collocati al piano terra (denominati nel seguito "AULA" e "SEGRETERIA") e a tali dati ci si riferirà per la validazione dei risultati (Figura 4). La simulazione ha riguardato il periodo compreso tra l'11 Luglio 2006 ed il 17 Luglio 2006, con frequenza oraria.

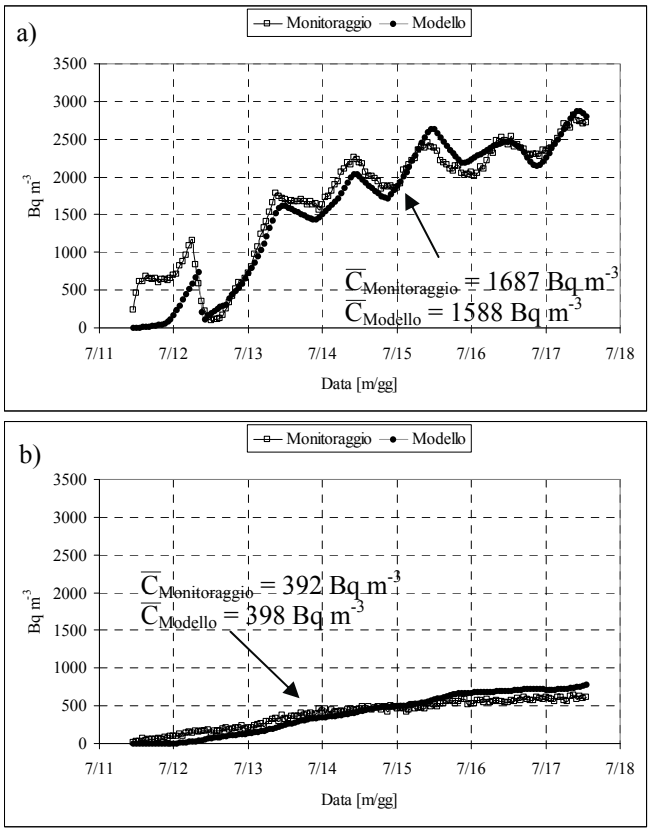


Figura 4 : Confronto tra concentrazioni registrate ('Monitoraggio') e simulate ('Modello') con riferimento ai locali: a) SEGRETERIA; b) AULA

Caso 2

L'abitazione è costituita da due piani. Il monitoraggio eseguito ha reso disponibile l'andamento in funzione del tempo della concentrazione di radon all'interno di due locali collocati al piano terreno, denominati nel seguito "STUDIO" e "SALA". Le misure fanno riferimento al periodo compreso tra il 17 Febbraio 2004 ed il 19 Febbraio 2004. Misure e simulazione sono state eseguite con la cadenza pari a 10 minuti. Il confronto tra i risultati della simulazione ed i dati sperimentali è proposto in Figura 5.

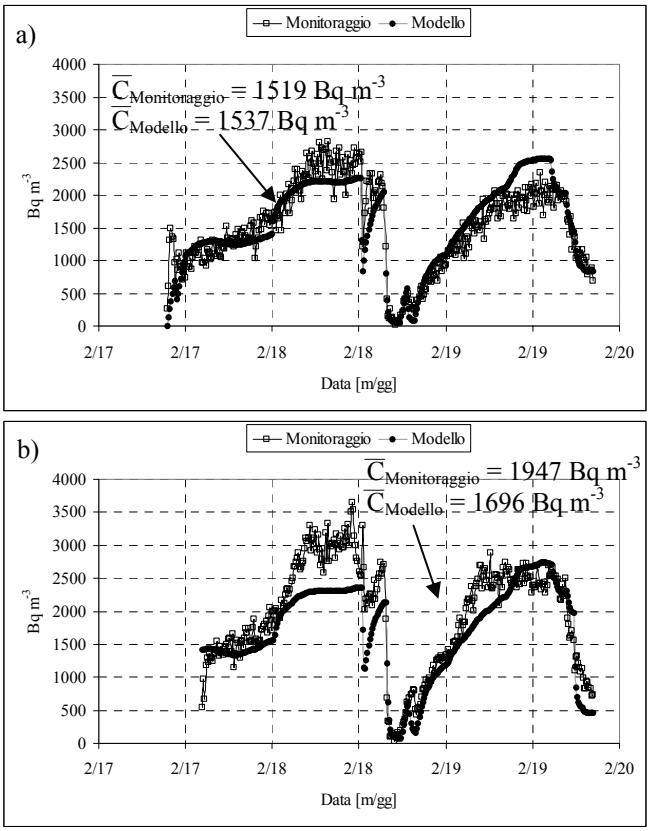


Figura 5 : Confronto tra concentrazioni registrate ('Monitoraggio') e simulate ('Modello') con riferimento ai locali: a) SALA; b) STUDIO

Caso 3

Il caso in esame riguarda un'abitazione mono-familiare collocata su tre livelli: semi-interrato, piano terra, e primo piano. Caratteristica peculiare di tale fabbricato è che il monitoraggio ha riguardato un locale semi-interrato. Per tale ambiente, a causa della maggior superficie a contatto con il terreno, sono state riscontrate le maggiori concentrazioni di radon tra i vari casi esaminati nel presente studio. Le misure eseguite hanno riguardato, in periodi successivi, tre locali dell'edificio collocati su tutti e tre i piani. Le misure hanno dapprima interessato una stanza da letto collocata al primo piano ("CAMERA_1P") per il periodo compreso tra il 10 Agosto 2005 ed il 12 Agosto 2005. Successivamente, tra il 12 Agosto ed il 14 Agosto, è stato monitorato l'andamento delle concentrazione presenti in un locale situato al piano terra ("STUDIO"). Infine, sono state registrate le concentrazioni di radon presenti nell'autorimessa ("GARAGE") dal 14 Agosto al 17 Agosto. Simulazioni e misure sono state eseguite con cadenza di 10 minuti. I risultati del modello di calcolo ed il rispettivo confronto con i dati sperimentali è proposto in Figura 6.

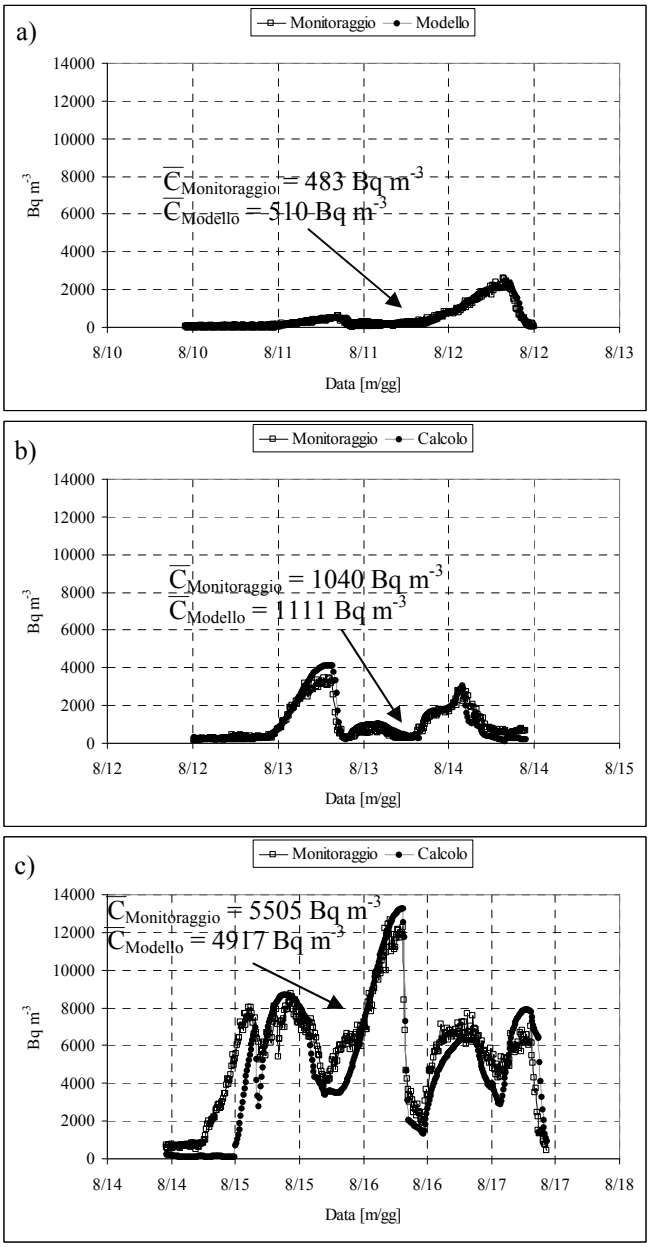


Figura 6 : Confronto tra concentrazioni registrate ('Monitoraggio') e simulate ('Modello') con riferimento ai locali: a) CAMERA_1P; b) STUDIO; c) GARAGE

Caso 4

L'abitazione è collocata su due piani. Il piano terra è organizzato in sei locali in comunicazione reciproca e adibiti tutti a zona giorno. Al piano primo si trovano invece quattro camere letto ed uno studio. I due piani sono messi in comunicazione da una scala. Il monitoraggio ha riguardato il periodo compreso tra il 26 Giugno 2009 ed il 20 Agosto 2009. La concentrazione di radon è stata registrata con cadenza oraria all'interno di due locali, collocati rispettivamente al primo piano ("STUDIO") ed al piano terra ("SOGGIORNO"). L'arco temporale compreso tra l' 8 Agosto ed il 16 Agosto coincide con la chiusura totale dell'abitazione. Tale periodo risulta di particolare interesse visto che, con riferimento ad esso, viene cioè a mancare la componente dovuta alle abitudini

di vita delle persone presenti (influenzanti, ad esempio, i cicli di apertura/chiusura delle finestre). L'unico flusso d'aria è quello che avviene a seguito della permeabilità dell'involucro, precedentemente determinata sperimentalmente grazie al ricorso al *blower door test*. Il confronto tra misure e risultati delle simulazioni è illustrato in Figura 7.

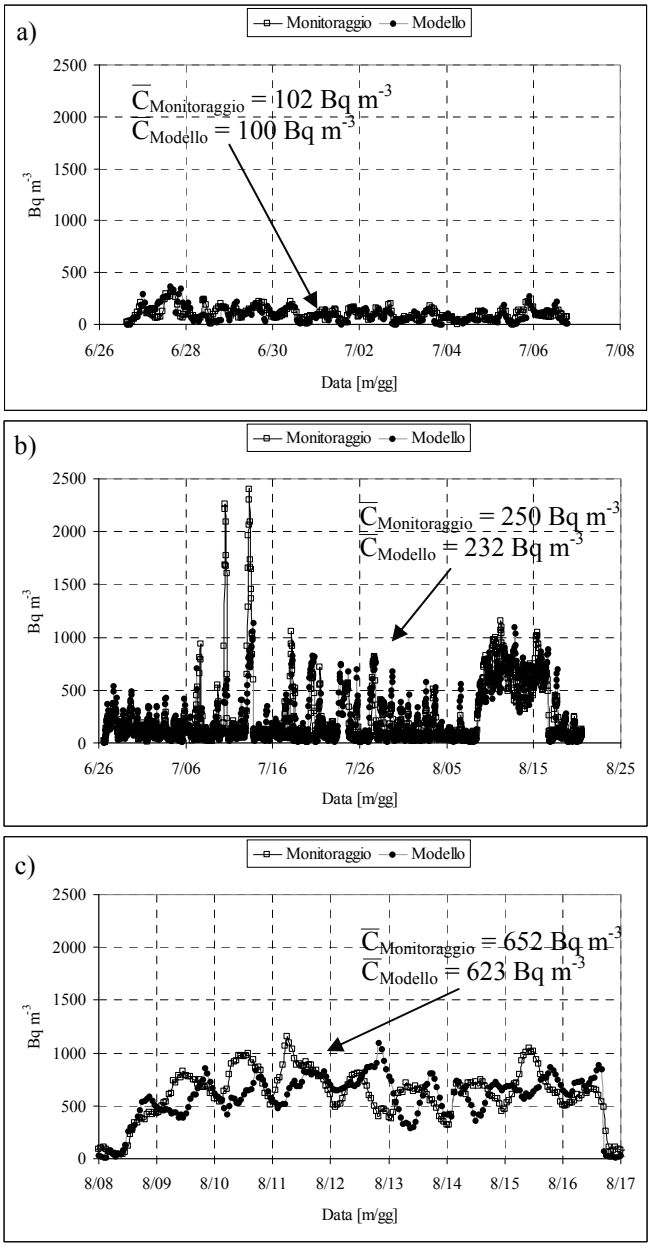


Figura 7 : Confronto tra concentrazioni registrate ('Monitoraggio') e simulate ('Modello') con riferimento ai locali: a) STUDIO; b) SOGGIORNO; c) SOGGIORNO (quest'ultimo riferito al periodo di non occupazione dell'edificio che ha ospitato il monitoraggio)

CONCLUSIONI

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di verificare l'adeguatezza di un modello di calcolo per la simulazione della generazione e del trasporto del radon all'interno di un edificio. Il buon riscontro tra i risultati delle simulazioni eseguite e i dati sperimentali resi disponibili da una serie di monitoraggi evidenzia l'applicabilità della tecnica di modellazione multi-zona al problema in esame. A fronte di alcuni scostamenti istantanei significativi, il buon accordo sulle concentrazioni medie è sempre stato mantenuto. Risulta interessante notare come il modello elaborato sia stato efficace non solo nel prevedere le concentrazioni di radon all'interno dei locali direttamente a contatto con il terreno, ma anche per gli ambienti (Cfr. Figura 6 – a e Figura 7 – a) non esposti direttamente all'infiltrazione di gas dal sottosuolo. I risultati della tecnica elaborata sono in grado di fornire indicazioni circa i locali maggiormente esposti a concentrazioni di radon potenzialmente pericolose per la salute umana, risultando questo di fondamentale importanza nella progettazione dei necessari interventi di bonifica. È da rilevare come il modello di calcolo abbia mantenuta la coerenza dei risultati pur trovandosi a lavorare con condizioni climatiche esterne molto diverse tra di loro.

Se l'abbinamento del modello alla prova sperimentale del *blower door test* ha dimostrato di essere in grado di prevedere l'infiltrazione ed il trasporto di radon nel caso di edificio non occupato, rimane da verificare la sensibilità della tecnica di simulazione alla "gestione" dell'edificio da parte delle persone presenti. Risulta inoltre da verificare la sensibilità del modello alla "qualità" dei dati meteorologici forniti per rappresentare l'interazione tra edificio ed ambiente esterno. L'obiettivo cui si tende è quello cioè di identificare i "macroparametri" in grado di preservare l'accuratezza del modello di calcolo anche in assenza di informazioni dettagliate circa l'edificio in esame ed il contesto climatico in cui è inserito.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro (ISPESL), Il radon in Italia: guida per il cittadino, 2007.
2. Indagine regionale per l'individuazione delle aree ad alto potenziale di radon nel territorio veneto (Regione Veneto), Verona 2000.
3. A. Bertolo, C. Bigliotto e G. Zannoni, Sperimentazione di azioni di rimedio su alcuni edifici con alta concentrazione da gas radon nel Veneto, Atti del Terzo Convegno Nazionale Controllo Ambientale degli Agenti Fisici, Biella (BI), 2006
4. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations), Sources and effects of ionizing radiations, 1993.
5. L. F. Guiteras, Radon generation and accumulation indoors, Ph. D. Thesis, Universitat Autonoma de Barcelona, 1997
6. W. W. Nazaroff, H. E. Feustel, A. V. Nero, K. L. Revzan, D. T. Grimsrud, M. A. Essling, R. E. Toohey, Radon transport into a detached one story house with a basement. Atmospheric Environment, Vol. 19, pp. 31-46, 1985.
7. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations), Sources and effects of ionizing radiations, 2000.
8. G. N. Walton e W. Stuart Dols, CONTAM 2.4b User Guide and Program Documentation, NISTIR 7251, NIST (National Institute of Standards and Technology), Gaithersburg (USA), 2006.
9. H. E. Feustel, COMIS – An international multizone air-flow and contaminant trasport model, Energy and Buildings, Vol. 30, No. 1, pp. 3-18, 1999.
10. UNI EN 12831 – Impianti di riscaldamento degli edifici: metodo di calcolo del carico termico di progetto, 2006.

STUDIO ACUSTICO CENTRO CONGRESSI IN COSTA SMERALDA

Strani Giancarlo[1], Luci Cristiano[1], Ragni Romina[1], Primieri Stefania[2]

[1]BIONOISE Ingegneria Ambientale, V. Gagarin 3, CORCIANO (PG)
[2]Studio Primieri, Fr. Montemolino 66/A, TODI (PG)

SOMMARIO

Nel presente lavoro viene illustrato l'approccio metodologico adottato nella progettazione acustica del Congress Center presso il Colonna Beach Hotel & Resort di Porto Cervo (OT).

Il gruppo ITI Hotels, proprietario della struttura, aveva intenzione di completare la dotazione ricettiva del complesso alberghiero con un centro congressi capace di ampliare le presenze in zona oltre la tipica stagione estiva. Visto il target di clientela anche nella fase convegnistica, la proprietà ha ritenuto necessario affidare a tecnici specializzati lo studio acustico del complesso congressuale.

Il compito è stato agevolato dalla possibilità di lavorare sull'allestimento delle sale partendo dallo stato grezzo della struttura. Lo studio è stato condotto con l'ausilio di software di modellazione matematica degli spazi interni, rilievi acustici sulle prestazioni di isolamento della struttura, studio dei trattamenti interni più idonei e stesura di capitolato di fornitura degli apparati audio-video. È stato quindi possibile accompagnare la committenza nella scelta di soluzioni acustiche e impiantistiche idonee alla complessità ed al livello della struttura ricettiva che, inaugurata nel maggio 2009 con il 52° Congresso del Distretto 2080 Rotary International, è risultata di grande qualità acustica e flessibilità organizzativa.

INTRODUZIONE

Il progetto acustico del Congress Center presso il Colonna Beach Hotel & Resort di Porto Cervo (OT) nasce dall'esigenza da parte della proprietà ITI Hotels di realizzare, all'interno del complesso alberghiero, un centro congressuale in grado di offrire spazi polifunzionali dove poter svolgere convegni, conferenze, proiezioni cinematografiche, serate danzanti, eventi vari.

Il progetto acustico del centro congressi è articolato su tre livelli: requisiti acustici passivi delle sale, acustica interna delle sale e scelta apparati audio-video.

La realizzazione del centro congressuale deriva dal recupero di un'area in fase di completamento; tale aspetto ha permesso di operare le scelte progettuali più opportune in collaborazione con la committenza e con le imprese di impiantistica ed edilizia chiamate alla realizzazione dell'opera.

Per tale motivo è stato possibile verificare in via preliminare le caratteristiche di isolamento acustico delle opere murarie esistenti, individuando i necessari interventi correttivi.

L'acustica delle sale è stata analizzata mediante modellazione su software Ramsete, lavorando in parallelo con i fornitori dell'impiantistica audio-video per le scelte degli apparati più idonei al soddisfacimento delle specifiche congressuali previste dai principali operatori nazionali nella convegnistica.

Lo studio BIONOISE, su incarico della committenza, ha coordinato la direzione lavori per le realizzazioni impiantistiche e le rifiniture riguardanti i trattamenti acustici; l'assistenza al gruppo ITI Hotels è proseguita nelle prime fasi congressuali, incluso l'evento inaugurale del maggio 2009 con il 52° Congresso del Distretto 2080 Rotary International.

DESCRIZIONE DEL CENTRO CONGRESSI

Il centro congressi, collocato al piano seminterrato dell'hotel, è costituito da un complesso di spazi polifunzionali articolati su una sala principale (Colonna) frazionabile in due parti (Smeraldo e Beach) ed una sala secondaria (Granu) utilizzabile sia come ulteriore spazio convegnistico che come area buffet; nella Figura 1 è illustrato il lay-out delle zone citate.

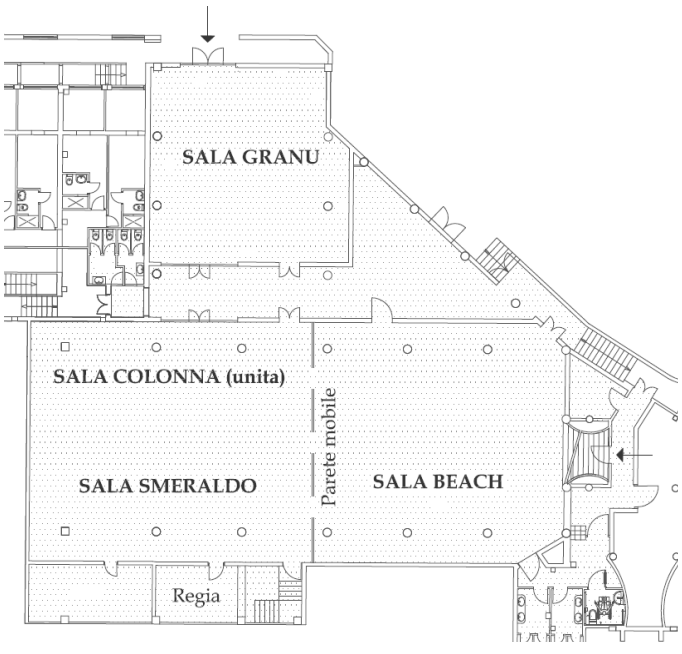


Figura 1: Lay-out del centro congressi

Per l'utilizzo degli spazi convegnistici, sono state stimate le capienze delle diverse sale come riportato in Tabella 1.

Tabella 1: Capienza stimata delle sale

SALA	CAPIENZA [persone]
Colonna	432
Smeraldo	208
Beach	192
Granu	96

REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DELLE SALE

Vista la collocazione del centro congressi all'interno del complesso alberghiero, l'analisi dei requisiti acustici passivi della struttura è stata la prima problematica progettuale esaminata.

Per far coesistere ambienti destinati ad usi diversi, anche in contrasto tra di loro, è necessario garantire un buon isolamento acustico; infatti, da un lato gli eventi in corso nelle sale non devono infastidire gli ospiti dell'albergo, dall'altro le manifestazioni allestite nelle sale non devono essere disturbate dalle attività svolte nelle aree di servizio limitrofe.

Le valutazioni sono state eseguite sullo stato grezzo della struttura, di cui si riporta un'immagine esemplificativa in Figura 2.



Figura 2: Vista della sala allo stato grezzo

La verifica del rumore di calpestio è stata tralasciata, dato l'elevato spessore dei solai caratterizzati da soluzioni dotate di elevata massa, corrispondenti comunque a parti superiori aperte (terrazzi/hall); l'isolamento attraverso le pareti laterali è stato invece verificato in dettaglio.

Prima delle fasi di completamento delle opere murarie, è stata sottoposta a verifica di isolamento la porzione di testa della sala Colonna (retro palco) vista la prossimità con corridoi di passaggio carrelli merce; la parete in calcestruzzo da 30 cm di spessore al grezzo presenta indice di valutazione del potere fonoisolante Rw pari a circa 54 dB. Mediante sorgente acustica con rumore bianco posta nel corridoio esterno, è stata verificata la prestazione reale della partizione, riscontrando indici di isolamento superiori a 50 dB. Nel progetto delle opere di isolamento è stato deciso di incrementare la prestazione delle pareti, applicando uno strato di appesantitore in gomma da 10 mm, ricoperto da sandwich lana di roccia e pannello in cartongesso; in Figura 3 è riportata una fase dell'intervento descritto.



Figura 3: Isolamento pareti laterali

ACUSTICA INTERNA DELLE SALE

Visto che le sale del centro congressi potrebbero accogliere eventi diversi, è stato curato lo studio acustico degli interni con particolare attenzione ai tempi di riverberazione; se per una sala da concerti, infatti, è preferibile un suono avvolgente ottenuto attraverso la presenza di pareti ed altri elementi architettonici riflettenti che allunghino il tempo di riverberazione, nel caso di utilizzo come sala conferenze o cinema, è auspicabile un tempo di riverbero molto basso e, di conseguenza, pareti assorbenti in modo tale da ottenere la prevalenza dell'onda diretta sul contributo complessivo della risposta all'impulso. Da queste poche considerazioni si può evincere come le esigenze siano di fatto in contrasto; il lavoro di modellazione acustica e definizione delle soluzioni di trattamento delle superfici e scelta degli apparati, condotto con la committenza, ha cercato di ottimizzare le soluzioni, prediligendo la fase congressuale.

Analisi preliminare

Il primo approccio allo studio dell'acustica interna delle sale è stato eseguito con una verifica dei tempi di riverberazione attesi nei vari spazi, utilizzando la teoria classica della riverberazione in campo sonoro perfettamente diffuso. Il modello, implementato in un foglio di calcolo, permette di valutare le risposte degli ambienti in termini di tempi di riverberazioni in bande d'ottava, confrontando l'ipotesi di sale senza trattamenti acustici e sale con interventi di correzione.

Per la sala Colonna, nell'ipotesi di superfici semplicemente intonacate e poltroncine mediamente occupate da persone, la predominanza di elementi riflettenti determina tempi di riverberazione elevati, in particolare alla frequenza centrale di 1000 Hz, alla quale, il valore del tempo di riverberazione è pari a 4,89 sec.

Per la stessa sala, la stima dei tempi di riverberazione è stata ripetuta introducendo le seguenti ipotesi correttive:

- pareti longitudinali e parete lato ingresso intonacate con cemento fonoassorbente in misto cemento sughero;
- parete retro palco in cartongesso con telo centrale acustico, tipo Barrisol, di dimensioni 6,0 x 3,0 (H) m;
- controsoffitto in legno acustico microforato sull'80% della superficie della sala, parte in quadrotti 60x60 cm e parte in listoni 28x180 cm con andamento ondulato.

Tenendo opportunamente in considerazione la presenza di alcuni tendaggi sul lato corridoio della sala ed alcuni arredi

come il banco oratori, considerando inoltre lo stesso numero di poltroncine calcolato precedentemente, si ottiene un netto miglioramento dei tempi di riverberazione, con valori prossimi a quelli ottimali come mostrato nel grafico di Figura 4. L'analisi preliminare descritta ha permesso di avviare una serie di attività legate nel crono programma di cantiere ad altre fasi lavorative che non permettevano tempi di studio maggiori.

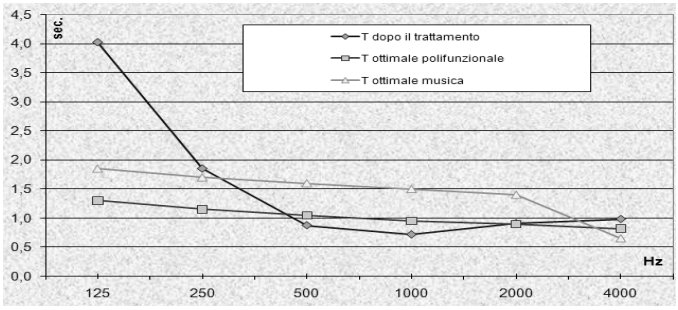


Figura 4: Tempi di riverberazione post-trattamento nella sala Colonna

Analisi con software Ramsete

Con le ipotesi di trattamento individuate in via preliminare, sono state avviate le attività di approfondimento della progettazione mediante l'utilizzo di Ramsete, specifico software di propagazione acustica in ambienti chiusi; coordinando le scelte dei materiali di finitura e dei dispositivi audio-video con le ditte incaricate della realizzazione, sono state inserite nel modello matematico le caratteristiche esatte degli apparati, le proprietà di assorbimento acustico dei materiali e la geometria di dettaglio definitiva delle sale.

Le simulazioni con Ramsete sono state eseguite considerando le principali configurazioni d'uso del centro congressi. Nel caso principale di pubblico nella sala Colonna, utilizzando due sorgenti frontali sulle colonne e otto sorgenti a soffitto, è stata eseguita la simulazione per ricavare la risposta all'impulso T_{30} della sala in tre postazioni di riferimento (R27, R52, R100), riportate nella planimetria tridimensionale di Figura 5; i risultati sono riportati nella Tabella 2.

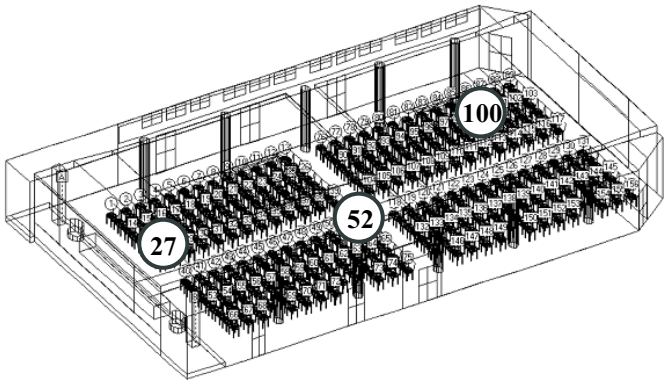


Figura 5: Posizione ricettori nella sala Colonna

Tabella 2: Valori del tempo di riverberazione T_{30} nella sala Colonna

Punto	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1.0 kHz	2.0 kHz	4.0 kHz	8.0 kHz
R27	1,07	0,70	0,47	0,48	0,62	0,61	0,60
R52	1,13	0,77	0,49	0,48	0,64	0,64	0,60
R100	1,13	0,78	0,50	0,50	0,66	0,67	0,61

Oltre ai tempi di riverberazione, la qualità acustica di una sala è connotata dagli indici di intelligibilità e distribuzione delle pressioni sonore nello spazio.

La simulazione con Ramsete è stata condotta anche per valutare i parametri acustici seguenti:

- indice di chiarezza per il parlato C50;
- indice di intelligibilità RASTI;
- livello di pressione sonora.

A titolo di esempio, nella Tabella 3 sono riportati i valori medi del C_{50} e del RASTI per la sala Colonna, nella Figura 6 l'andamento dell'indice di chiarezza C_{50} ad altezza 1,2 m da terra per la stessa sala.

Tabella 3: Andamento indici acustici medi nella sala Colonna

Indice	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1.0 kHz	2.0 kHz	4.0 kHz	8.0 kHz
C_{50}	-0,68	2,1	5,4	5,31	3,41	2,73	4,08
RASTI	0,74	0,81	0,87	0,86	0,82	0,81	0,84

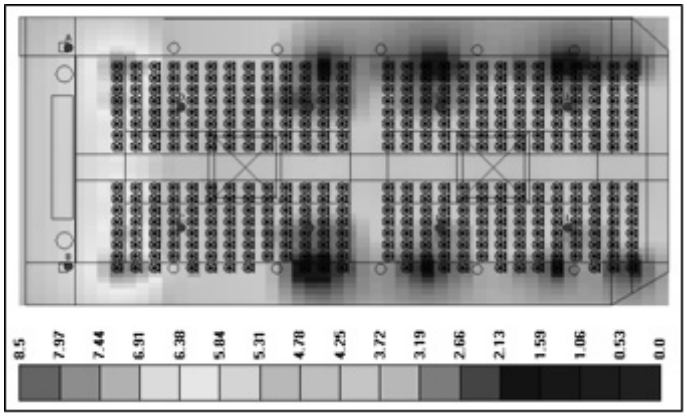


Figura 6: Indice C_{50} ad altezza 1,2 m da terra per la sala Colonna

Interventi acustici

Le scelte di trattamento acustico adottate sono state condizionate da alcuni fattori specifici discussi con la committenza, tra cui pavimento in monocottura e pareti intonacate. Partendo da questi vincoli, l'attività di trattamento acustico si è concentrata sulla tipologia di intonaco delle pareti laterali, optando per un intonaco ad elevato coefficiente di assorbimento, e sul soffitto. La soluzione progettuale del soffitto ha tenuto in considerazione la necessità di un'impronta architettonica alla sala, necessità tecniche di applicazione apparati audio-video, passaggio cavi ed in ultimo corretta collocazione del sistema di climatizzazione. La scelta finale è caduta quindi su superfici in legni acustici con mix di forme e colorazioni, dove sono stati posizionati alcuni elementi in cartongesso a punta di diamante, costituenti un elemento tipico degli altri spazi del complesso alberghiero. Si riporta nel seguito una breve descrizione dei vari interventi:

- Controsoffitto – Per l'altezza modesta della sala non è stato possibile lavorare su soluzioni di altezza differenziata progressiva. Si è ritenuto però opportuno intervenire attraverso il rivestimento in legno acustico fonoassorbente e sovrastante materassino in fibra di poliestere. Gli elementi fonoassorbenti sono realizzati in legno tipo MDF con aree microforate. Tenendo conto delle esistenti costolature in cartongesso di alloggiamento canali aria, disposte longitudinalmente ai lati della sala e trasversalmente al centro, la disposizione dei legni acustici ideata viene a creare due aree rettangolari con al

centro un riquadro in cartongesso e volta leggermente piramidale di motivo architettonico. Per buona parte della sala, l'andamento del controsoffitto è orizzontale con quadrotti di dimensioni 600x600 mm; alle estremità della sala il controsoffitto si raccorda all'intradosso del solaio con doghette di dimensioni 280x1800 mm. Per fini estetici, è stata mantenuta la stessa matrice di foratura per le diverse forme degli elementi in legno acustico, mentre è stata individuata una diversa colorazione dell'essenza, utilizzando un color pero per la zona centrale in pannelli quadrati ed un color faggio per le zone di estremità con pannelli rettangolari (vedi Figura 7).

- Pareti – Le pareti della sala sono state trattate con intonaco fonoassorbente in cemento-sughero. Questo trattamento sulle pareti laterali della sala comporta una forte riduzione dei tempi di riverberazione con leggera penalizzazione della resa acustica in occasione di rappresentazioni musicali; si è optato comunque per questa soluzione privilegiando la qualità acustica degli eventi convegnistici, che costituiscono la principale destinazione degli spazi, e rimandando l'ottimizzazione di altri tipi di eventi all'utilizzo dei sistemi di equalizzazione elettronica.
- Palco oratori – Il palco oratori è stato realizzato con pedana in legno rivestita di moquette. Nella parete retrostante è stata eseguita una lavorazione in cartongesso, così da creare un riquadro incassato bordato con luce perimetrale e rivestito frontalmente con un telo acustico tipo Barrisol.
- Arredi – I tendaggi e le poltroncine, con seduta e schienale in tessuto, sono ulteriori elementi fonoassorbenti della sala.
- Parete divisoria – Come descritto in precedenza, la sala Colonna può essere frazionata in due sale minori attraverso una parete manovrabile intermedia, realizzando così due sale simili (Smeraldo e Beach) tali da permettere lo svolgimento di eventi in contemporanea. La parete divisoria è stata realizzata con pannelli mobili di alto potere fonoisolante; la parte sovrastante la guida, collocata all'interno della costola trasversale in cartongesso, è stata opportunamente schermata con materassini in lana di roccia e cartongesso fino all'intradosso, ad evitare attraversamenti acustici tra le sale.



Figura 7: Dettaglio trattamento controsoffitto

In Figura 8 è riportata la geometria dello stato di progetto riprodotta in Ramsete, mentre in Figura 9 è presentata la vista dell'allestimento finale della sala Colonna in occasione dell'evento inaugurale.

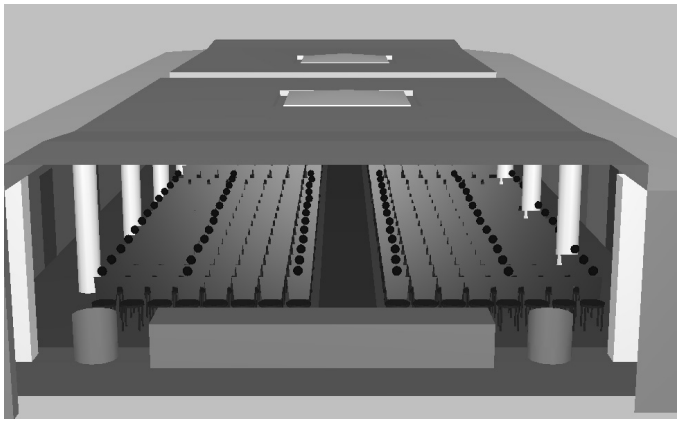


Figura 8: Vista prospettica dal palco dello stato di progetto della sala Colonna



Figura 9: Vista prospettica dal fondo della sala Colonna ultimata

APPARATI AUDIO-VIDEO

In collaborazione con installatori specializzati, sono state individuate le soluzioni impiantistiche audio-video, sia come scelta degli apparati, che come disposizioni operative di installazione e regolazione.

Punto di partenza nelle scelte progettuali sono state le rigide specifiche delle organizzazioni degli eventi, tipo Rotary e RAI, connotate da esigenze di livello degli apparati audio video, presenza di schermi multipli, possibilità di riversare in streaming un evento su pagina web, previsione di video conferenze e traduzione simultanea, interconnessione audio video tra le diverse sale e tra centro congressi ed altre aree del complesso alberghiero. Gli allestimenti della sala principale e delle sale in configurazione frazionata hanno tenuto conto di tutti gli aspetti funzionali dettati dalle specifiche citate; in ultimo è stata prevista una serie di soluzioni impiantistiche che permettessero l'utilizzo delle sale, attrezzate con banchi scuola per eventi tecnici e formativi specifici dove i partecipanti devono necessariamente essere dotati di laptop connesso in rete.

Il complesso degli apparati previsti, scelti in collaborazione con PRASE Engineering, sono caratterizzati da elevata qualità audio video dei singoli apparecchi, ma anche da una filosofia progettuale mirante a grande flessibilità delle funzione e semplicità di configurazione per le diverse situazioni convegnistiche ipotizzabili. Il tutto è stato realizzato mediante ricorso a matrici audio video digitali, tablet wireless di gestione degli apparati e scenari di sala preconfigurati; la

gestione delle sale è realizzabile sia dall'apposita area regia che da postazioni locali indipendenti. In Figura 10 è riportato un esempio di configurazione delle funzioni delle sale su PC.



Figura 10: Schermata gestione scenari sale

Particolare cura è stata rivolta alla qualità dei sistemi audio costituenti il cuore del sistema sale convegni; dopo varie negoziazioni con la committenza è stato possibile optare per soluzioni di elevata qualità pur con qualche sacrificio economico nell'ottica di realizzare un complesso convegnistico di livello adeguato alla struttura alberghiera. Su questa base sono stati scelti diffusori a parete e soffitto, sistemi di amplificazione e registrazioni, microfoni e dispositivi di interconnessione capaci, oltre che di riprodurre il suono nelle sale con elevata qualità, anche di evitare fastidiosi fenomeni di sibili, fruscii e rumori elettronici nelle varie fasi di utilizzo delle svariate postazioni microfoniche.

È stato, inoltre, necessario realizzare su disegno il palco oratori, per integrare in maniera sobria l'elevato numero di apparati elettronici audio e video destinati alle varie funzionalità richieste. In Figura 11 si riporta uno scorcio del palco lato oratori.



Figura 11: Vista palco oratori

COLLAUDO

L'evento inaugurale del Congress Center si è tenuto in data 15 maggio 2009 con il citato 52° Congresso del Distretto 2080 Rotary International. Precedentemente al congresso è stata eseguita una verifica dei sistemi installati nella sale con formazione dei tecnici addetti in collaborazione con la struttura e tecnici RAI incaricati da Rotary di gestire l'evento. In data 12 maggio 2009 con i nostri collaboratori della PRASE Engineering di Firenze è stato eseguito un collaudo sui tempi di riverberazione in sala. Nel diagramma di Figura 12 si riporta l'andamento del T_{60} rilevato comparando con i valori ottimali previsti nel progetto per situazione convegnistica e riproduzione musicale (per la quale è stato assunto un valore intermedio tra musica da camera e sinfonica).

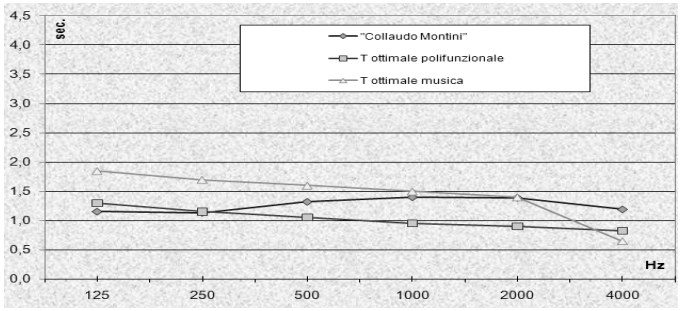


Figura 12: Tempo di riverberazione T_{60} sala Colonna vuota

I risultati di collaudo ottenuti testimoniano la correttezza delle scelte progettuali, confermando in pieno i valori previsionali ottenuti dal modello Ramsete.

Prescindendo dai valori strumentali indicati, la migliore conferma del lavoro eseguito si è avuta nelle fasi del Congresso Rotary, dove anche ai non esperti in acustica è risultata evidente la qualità audio, soprattutto in termini di chiarezza del parlato, essenziale in aree destinate ad eventi convegnistici. In Figura 13 è riportato l'allestimento della sala per il congresso citato; in Figura 14 è riportato un momento del congresso Rotary del 15-16 maggio 2009



Figura 13: Allestimento palco per il 52° Congresso Rotary



Figura 14: 52° Congresso Rotary

CONCLUSIONI

Lo studio descritto nel presente lavoro evidenzia alcuni aspetti importanti, spesso sottovalutati nell'affrontare realizzazioni di spazi convegnistici o polifunzionali in genere.

Tralasciando per un attimo la pura analisi tecnica dei risultati acustici ottenuti, in termini di corretti tempi di riverberazione ed elevata intelligibilità delle sale, quindi chiarezza e qualità dell'audio, occorre mettere in evidenza il corretto approccio tenuto dalla committenza. Molto spesso, realizzazioni simili vengono affrontate dal punto di vista acustico, in fase finale dell'esecuzione lavori. Ciò comporta inevitabilmente a sottostare a numerosi vincoli esistenti, causa scelte già fatte e magari eseguite su murature, impianti, ecc.; i vincoli presenti costringono il progettista acustico a porre in atto, laddove possibile, soluzioni tampone che lasciano poco spazio ad interventi realmente efficaci.

Nella realizzazione del Congress Center presso il Colonna Beach Hotel & Resort di Porto Cervo, la problematica acustica è stata posta come essenziale fin dalla prima fase decisionale del progetto; ciò ha permesso di accompagnare la committenza in tutte le fasi di scelta delle soluzioni costruttive, cercando di massimizzare il rapporto risultati-costi. In effetti, pur non lasciando spazio a compromessi al ribasso, la realizzazione del compresso congressuale non ha comportato costi elevati, se paragonati al livello qualitativo raggiunto.

Oltre che negli aspetti acustici specifici, contenuti nel progetto redatto, uno degli aspetti vincenti è stato quello di poter coordinare, su specifico incarico della committenza, tutti i professionisti e le imprese che hanno contribuito all'esecuzione dei lavori; quindi gli impianti elettrici, gli impianti di climatizzazione, le soluzioni architettoniche, gli aspetti antincendio, oltre che i requisiti sugli apparati audio-video, sono stati efficacemente coordinati nell'intento di non lasciare nulla al caso.

L'aspetto acustico della progettazione degli spazi congressuali ha confermato in pieno le previsioni dei modelli elaborati; ciò è stato possibile grazie al livello di dettaglio introdotto nel modello Ramsete, garantito dalla precisione e quantità dei dati acustici dei singoli apparati forniti da PRASE Engineering. In particolare, dopo un'accurata modellazione geometrica degli spazi nel modulo CAD del software, è stato possibile inserire tutte le caratteristiche di prestazione acustica in frequenza inclusa la direttività delle casse acustiche prescelte, sia per quelle a parete e, cosa più complicata, per quelle a soffitto. La continua ottimizzazione su scelta e quantità delle superfici assorbenti ha portato al raggiungimento delle prestazioni acustiche descritte, in tutte le configurazioni di utilizzo delle sale.

Il centro congressi dell'Hotel Colonna si distingue oggi come l'unico complesso della Costa Smeralda dotato di una struttura congressuale di una certa qualità e dotazione di servizi; ciò sta portando ad un forte sviluppo, in particolare nel 2010 della convegnistica programmata nei mesi primaverili ed autunnali, dove la tipica domanda di pernottamento è minore rispetto al picco dei mesi estivi.

BIBLIOGRAFIA

1. R. Spagnolo: *Manuale di acustica applicata*, Ed. Utet Libreria, 2002
2. L.L. Beranek *Concert hall acoustics – 1992*, J.A.S.A. 92 (1), July 1992
3. L.L. Beranek, I.L. Vér: *Noise and Vibration Control Engineering, Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 1992
4. A.Farina, P. Galaverna, G Truffelli, "RAMSETE" un nuovo software per la previsione del campo sonoro in teatri, ambienti industriali ed ambiente esterno, Atti del XXII Convegno Nazionale AIA, Lecce 1994

VALUTAZIONE DEL MICROCLIMA LUMINOSO IN AMBIENTE SCOLASTICO TRAMITE APPROCCIO ADATTIVO

Alessandra Galatioto [1], Angelo Milone [2], Salvatore Pitruzzella [3]

[1]Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali. Università di Palermo. alessandra.galatioto@dream.unipa.it
[2]Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali. Università di Palermo. amilone@dream.unipa.it
[3]Dipartimento di Ingegneria Civile. Università di Messina. pitruzzella@architettura.unipa.it

SOMMARIO

Questo articolo mostra i risultati di una indagine compiuta in ambiente scolastico e basata su un questionario di tipo adattivo, mirata alla valutazione del microclima luminoso e del grado di soddisfazione dello stesso da parte degli utenti.

Attraverso simulazioni, sono state preventivamente individuate alcune aule all'interno della struttura scolastica, dove le condizioni potevano risultare critiche, sia per il verificarsi di fenomeni di abbagliamento, che di non rispetto dei valori consigliati dalla vigente normativa. La metodologia proposta prevede l'utilizzo di rilevamenti strumentali, di simulatori e la somministrazione di un questionario agli studenti delle aule in oggetto.

Il questionario, basato sul modello adattivo, è stato articolato per il rilevamento di dati strettamente soggettivi (postazione occupata, visus…) e di dati riguardanti l'ambiente e il rapporto degli utenti con esso (difficoltà nello svolgimento del compito visivo, frequenza media annuale di utilizzo delle schermature, ecc…).

I risultati del questionario, mappati secondo rappresentazione cromatica sulle postazioni occupate, mostrano elevati gradi di insoddisfazione, nonostante le misure strumentali abbiano riscontrato valori quantitativamente accettabili. Una ulteriore simulazione, mostra la possibilità di interventi correttivi, non invasivi, per il controllo della illuminazione naturale, i cui risultati mostrano un abbassamento quantitativo dei valori ottimali, ma un netto miglioramento qualitativo delle condizioni luminose microclimatiche. Il processo sviluppato, che vede il confronto e l'integrazione tra metodologia tradizionale e sperimentale, consente di valutare gli indici di scostamento che, risultano essere elevati per la totalità del tempo di occupazione delle aule.

INTRODUZIONE

La corretta illuminazione naturale delle aule scolastiche, così come dei luoghi di lavoro è condizione necessaria per consentire lo svolgimento dei compiti visivi in qualsiasi stagione ed almeno nelle ore del giorno canoniche di svolgimento delle lezioni. Tale illuminazione deve sempre essere adeguata qualitativamente e quantitativamente al tipo di mansione svolta.

Negli ambienti scolastici, l'esigenza di mantenere gli elevati valori prestazionali richiesti dalla normativa vigente impone la simultanea verifica di numerosi parametri del microclima luminoso.

Tuttavia, le suddette condizioni possono presentare una fluttuazione di scostamento dagli indici ottimali, non rilevabili attraverso le tradizionali verifiche strumentali.

Il corretto utilizzo di luce naturale influenza le funzioni vegetative, ma serve anche da stimolo per le attività mentali, infatti, si ottiene un aumento dello stimolo lavorativo e un ritardo dell'insorgere della stanchezza.

Il microclima luminoso risulta fortemente influenzato dalle configurazioni architettoniche le quali vertono sull'utilizzo massimo della luce naturale disponibile, provocando, a volte, importanti condizioni di discomfort se non opportunamente controllata. Pertanto un "ambiente luminoso" fortemente disomogeneo è spesso causa di astenopia occupazionale, che in medicina del lavoro ed igiene occupazionale viene definita "disagio/disturbo da luce" [1].

Le attuali tendenze della comunità scientifica vertono alla determinazione di indici basati sulla sensazione e sul gradimento del microclima di un ambiente confinato degli effettivi fruitori di tali spazi, i cui aspetti sono stati spesso indagati usando metodologie che fanno ampio uso della statistica.

Nel campo illuminotecnico non esiste una chiara e definita metodologia di indagine che possa condurre a definire tali indici di valutazione come, invece, avviene nel caso del microclima termoigrometrico, attraverso l'impiego degli indici di sensazione PMV e PPD, i quali riescono ad esprimere numericamente ed in maniera ormai molto attendibile, vista la continua affinazione del modello, quale sarà il "gradimento" da parte degli utenti nei confronti delle condizioni ambientali [2].

Tuttavia, esistono degli approcci riconducibili all'uso di strumentazione, simulatori ed all'utilizzo di un modello dinamico, che per alcuni aspetti può ritenersi incompleto [3].

Le esigenze di illuminazione di un ambiente variano, come è noto, in base alle attività che in esso vi si svolgono oltre che dall'esposizione dell'edificio a cui è legata la disponibilità di luce naturale. Di conseguenza, nasce la necessità di un controllo rigoroso di tale grande risorsa che può, altrimenti, provocare condizioni importanti di discomfort sia visivo che termico, come l'abbagliamento o il surriscaldamento estivo.

L'obiettivo fondamentale di questa continua ricerca è quello di espletare la propria qualità in tre ambiti definiti e relativi all'individuo, alle implicazioni economiche e a quelle ambientali.

QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

Nell'anno 2004 viene recepita la norma UNI EN 12464 – 1

- *Luce e Illuminazione – Illuminazione dei posti di lavoro – Parte 1- Posti di lavoro in interni* [4], la quale definisce i criteri di qualità degli impianti per una buona visione, metodologie di misura e criteri progettuali.

Unitamente alla norma UNI 10840 - *Luce e Illuminazione – Locali scolastici – Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale*, recepita nel 2007, vengono definiti in modo preciso i livelli di illuminamento all'interno dei locali scolastici, in relazione alla difficoltà dei compiti visivi da svolgere [5].

Nello specifico nei locali scolastici, oggetto di questo studio, tale norma suggerisce la preferenza dell'utilizzo della luce naturale rispetto a quella artificiale, per un migliore equilibrio psico-fisico dell'occupante nonché un conseguente risparmio energetico [6].

A tale proposito viene recepita l'ulteriore norma UNI EN 15193 – *Requisiti energetici per l'illuminazione* [7], recepita nel marzo 2008, che definisce un indicatore numerico dei requisiti energetici per l'illuminazione da utilizzare per la certificazione energetica fornendo, inoltre, una metodologia per il calcolo dell'energia istantanea consumata per l'illuminazione e per la stima dell'efficienza energetica globale dell'edificio, escluse le potenze parassite non incluse negli apparecchi. Si tratta di uno dei primi tentativi di isolare i consumi relativi all'illuminazione, in modo tale da valutare l'efficienza dell'impianto di illuminamento. La metodologia e il formato devono soddisfare i requisiti della Direttiva CE sul rendimento energetico negli edifici 2002/91/CE [8].

Proprio i consumi relativi all'illuminazione vengono presi in considerazione dalla normativa nazionale entrata in vigore il 10 luglio 2009 all'interno delle "Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica" [9], in cui il calcolo dell'EPgl considera oltre a: EPi (Energia Primaria invernale), Epe (Energia Primaria estiva), EPacs (Energia Primaria acqua calda sanitaria),anche EPill (ancora non in vigore).

IL CASO DI STUDIO

Per questa ricerca sono state prese in esame alcune aule dell'Istituto Nautico "Gioeni -Trabia" di Palermo, la cui progettazione e costruzione risale alla prima metà del '900.

Nello specifico l'indagine svolta ha riguardato alcune delle aule del sopracitato Istituto, significative per la loro esposizione che sono state analizzate in alcuni periodi rappresentativi delle condizioni più favorevoli o più sfavorevoli in termini di quantità e disponibilità di illuminazione naturale. Nella Figura 1 che segue è riportata una vista del prospetto principale dell'istituto.



Figura 1. Prospetto Sud dell'Istituto Nautico Gioeni – Trabia, Palermo.

METODOLOGIA

Per arrivare ad una valutazione attendibile e quanto più oggettiva del microclima luminoso è necessaria la comparazione di alcuni parametri, nonché il controllo di differenti dati acquisiti con altrettanti strumenti e metodi.

Dopo un attento rilievo architettonico degli ambienti, anche al fine di costruire un modello per alcune simulazioni dell'incidenza solare sul manufatto, considerata la relazione con il contesto, si è ritenuto opportuno procedere all'acquisizione dei dati utilizzando una metodologia di tipo tradizionale ed una di tipo sperimentale, in modo da consentire l'attendibilità del dato e la verifica validante e simultanea.

Successivamente si è individuato il livello di difficoltà dei compiti visivi (lettura, scrittura sul foglio di carta sul banco, lettura sulla lavagna dal banco, scrittura sulla lavagna, deambulazione tra i banchi) , *task mapping*, individuazione e catalogazione degli apparecchi di illuminazione;

I rilevamenti effettuati nel mese di dicembre hanno evidenziato, durante lo svolgimento delle lezioni, livelli di sovra-illuminamento costante in difformità con le prescrizioni della normativa vigente.

Un'ulteriore analisi, condotta attraverso la simulazione del fenomeno del *daylighting*, manifesta una condizione pregiudizievole al corretto svolgimento del *visual task* da parte degli studenti.

Si precisa tuttavia che, in questo studio il concetto di v*isual task* non viene inteso come nella precedente normativa, ossia come piano generalizzato, bensì come una porzione del banco in cui lo studente è seduto e nel quale viene esercitato il compito visivo.

Altresì, la *task-area* viene impiegata per determinare i compiti visivi che i soggetti eserciteranno sulla lavagna.

Entrando nel dettaglio della metodologia di indagine, le simulazioni preventive dei percorsi solari e del rapporto sole-manufatto sono state effettuate attraverso l'impiego del software Ecotect® v 5.50 della Square-1.

Durante tale fase, particolare attenzione è stata prestata al corpo principale che ospita numerose aule distribuite su 5 livelli ed è prospiciente uno degli assi principali della città di Palermo.

Il primo passo effettuato è stato lo studio dell'ombreggiamento della facciata in oggetto nei giorni 21 marzo, 21 maggio, 21 settembre, 21 dicembre, dalle ore 8:00 alle ore 18:00, riconducibili al pieno impiego dell'istituto ed alla fascia oraria di fruizione dello stesso.

Nella Figura 2 che segue, è riportata una immagine di tale simulazione, al fine di effettuare uno screening preliminare sulle aule oggetto dell'indagine.

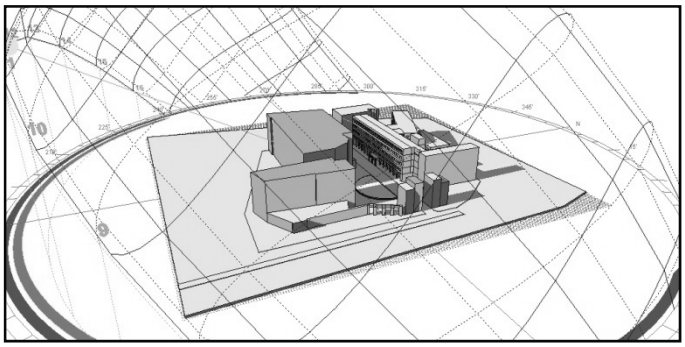


Figura 2. Simulazione in data 21 dicembre alle ore 12.00 delle aree in ombra e soleggiate sul prospetto Sud dell'edificio.

Successivamente sono state condotte delle misure sul campo attraverso l'impiego di un luxmetro-colorimetro della Minolta, modello CL-200 e di un luminanzometro LS-110 della medesima casa costruttrice. Tali indagini hanno consentito di stilare una classifica delle aule in "condizioni critiche" dal punto di vista del microclima luminoso oggetto di indagine, favorendo la scelta degli ambienti più significativi ai fini dell'analisi. Una ulteriore simulazione ha riguardato il calcolo del *Daylight Factor* e del *Daylight Level* su tutti i piani dell'edificio esposti sulla facciata Sud [10]. Una mappatura cromatica è stata predisposta per definire i livelli e la qualità dell'illuminamento negli spazi. Nella Figura 3 che segue è riportata un'immagine dell'analisi effettuata. I dati di input corrispondono alle seguenti funzioni del software Ecotect:

- *Calculation type*: *Natural Light Level – Daylight Factor & Levels* (Tipo di calcolo: Livelli di luce naturale – e fattore di illuminazione naturale);
- *Calculate Over: Analysis Grid* (Calcolo su griglia);
- *Design Sky Luminance: 6 000 lux* (Valore di illuminamento della volta celeste);
- *Sky Conditions: Overcast*(Condizione del cielo: coperto);
- *General Settings: High* (Settaggi generali);
- *Window Cleanliness: Dirty (0.75)* (Pulizia e delle superfici vetrate: sporco).

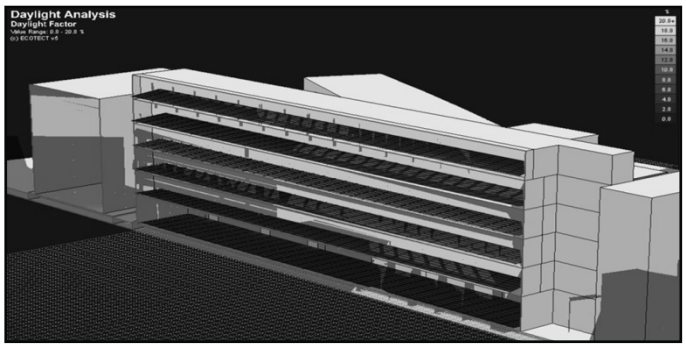


Figura 3. Mappatura del Daylight Factor (%).

RISULTATI SPERIMENTALI

La fase di costruzione e studio dell'involucro ha permesso di capire quali aule risultano svantaggiate dal punto di vista del comfort visivo, in particolare:

- N.1 aula posta in posizione marginale al 2° livello, avente una parete esterna priva di aperture, la parete prospiciente il corso principale presenta quattro aperture quadrate 1.50 x 1.50; Capienza aula: 30 persone;
- N.1 aula posta al 3° livello in posizione centrale, la parete prospiciente il corso principale presenta tre aperture quadrate 1.50 x 1.50; Capienza aula: 18 persone;
- N.1 aula posta al 4° livello e presenta due pareti cieche. La parete prospiciente il corso principale presenta tre aperture quadrate 1.50 x 1.50; Capienza aula: 18 persone;

Per brevità, in questo articolo viene riportata solamente l'indagine condotta nell'aula posta al 2° livello, sufficientemente rappresentativa della metodologia adottata.

Nella Figura 4 che segue, viene riportata una sovrapposizione delle piante ai vari livelli, esplicativa delle relative ubicazioni, mentre nella Figura 5 è riportata una vista interna dell'aula.

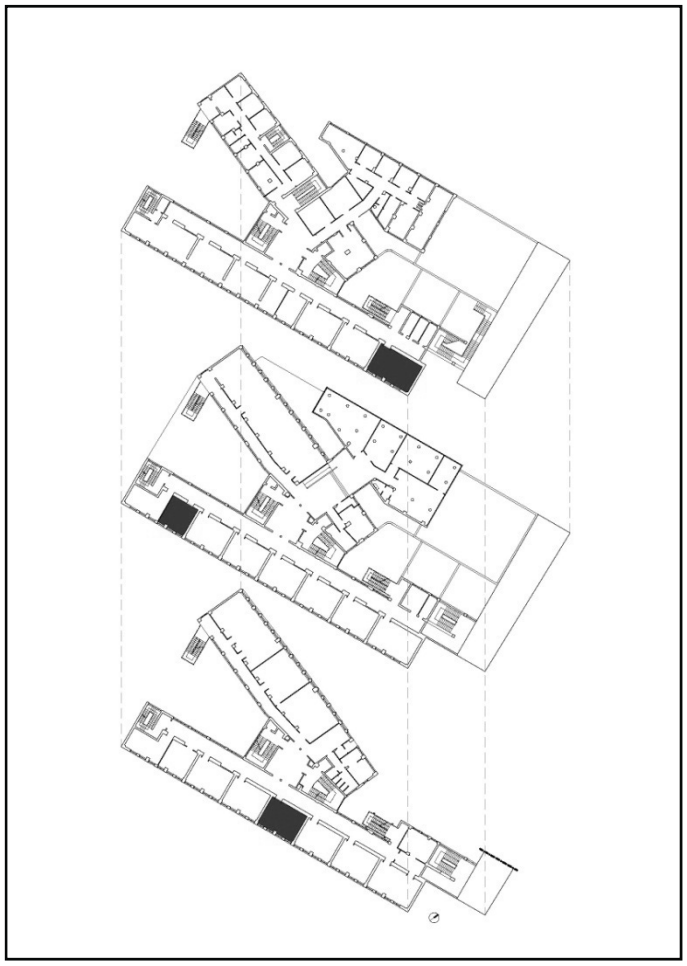


Figura 4. Ubicazione ai vari livelli delle aule oggetto di indagine.



Figura 5. Vista interna dell'aula oggetto di indagine.

L'interno dell'aula occupato dagli studenti è stato suddiviso in Cluster e Frame [11], al duplice scopo di identificare le postazioni occupate dagli studenti e di individuare i punti sui quali simulare i valori di Daylight Factor (%). Tali porzioni di spazio rappresentano dei rettangoli di dimensioni definite, all'interno dei quali si trovano posizionati i banchi ed all'interno della superficie di questi ultimi lo spazio interessato ai compiti visivi di lettura-scrittura da parte degli occupanti.

Nelle seguenti figure 6 e 7 sono riportate rispettivamente la suddivisione suddetta ed i relativi punti di misura all'interno degli stessi.

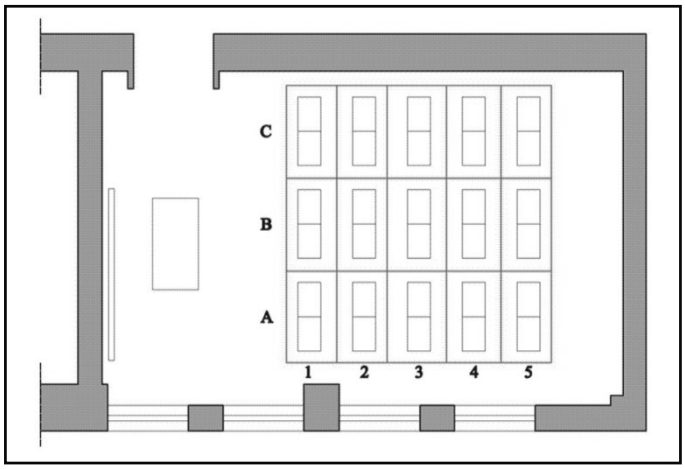


Figura 6. Suddivisione dell'aula oggetto di studio c*luster* e *frame.*

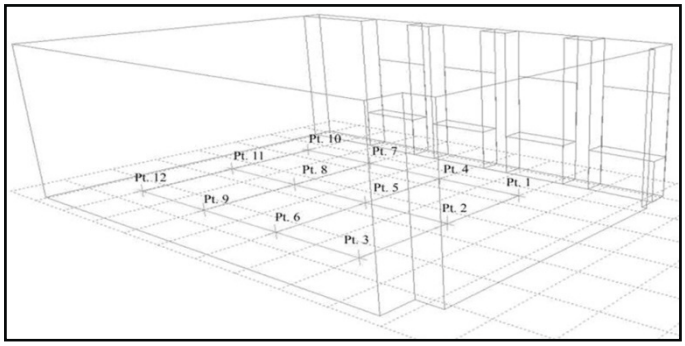


Figura 7. Punti di misura (Test Point) all'interno dell'aula oggetto di studio.

Allo scopo di validare il modello di studio, sono state indagate nelle medesime condizioni le ore di utilizzo delle aule tramite simulazioni dinamiche le quali risultano verosimili considerando il trascurabile indice di scostamento con i dati rilevati. Di seguito, in Figura 8 è apprezzabile l'entità di tale scostamento, poichè si riporta l'andamento dei livelli di illuminamento (lux), nell'intervallo di ore indagato, di due dei Test Point in oggetto: Pt. 1 (Test Point rilevato), Pt.s 1 (Test Point simulato), Pt.4 (Test Point rilevato), Pt.s 4 (Test Point simulato).

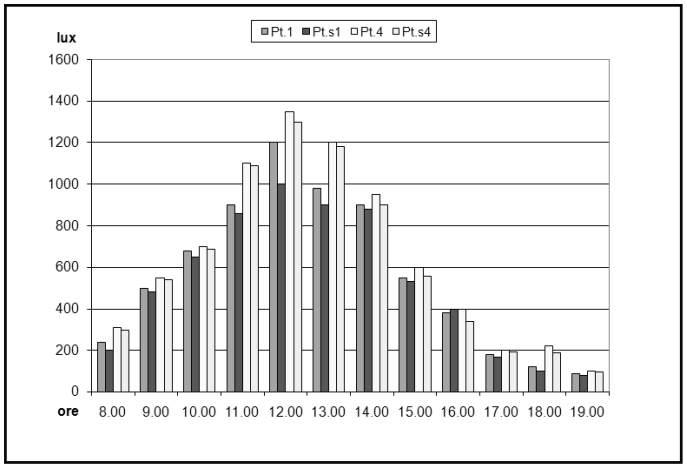


Figura 8. Analisi dello scostamento tra Test Point rilevati (Pt.n) e Test Point simulati (Pt.sn).

Nelle Tabella 1 e Figura 9 seguenti sono riportati i valori di *Daylight Factor* simulati. È stato calcolato il valore di DF (%) medio che risulta essere 4.1%, qualitativamente accettabile, ma il confronto con i valori di illuminamento E (lux) riportati nel grafico di Figura 9, fanno riscontrare valori eccessivamente elevati, tali da provocare difficoltà nello svolgimento del compito visivo.

Tabella 1. Simulazione dei valori di DF (%).

Pt	DF (%)	Pt	DF (%)
1	5.3	7	5.8
2	4.1	8	4.3
3	3.5	9	3.7
4	3.1	10	4.1
5	3.9	11	3.8
6	3.9	12	3.6
Valore Medio 4.1 (%)			

La parte dell'indagine riguardante il livello di illuminamento sui banchi (lux) è riportata nelle figure 9 e 10 seguenti. In particolare, è stato valutato l'andamento del livello di illuminamento per le date del 21 Marzo, 21 settembre, 21 maggio, 21 dicembre. L'arco temporale di riferimento è quello che va dalle ore 8:00 alle ore 18:00, fascia oraria nella quale i locali della scuola vengono fruiti maggiormente per le lezioni ed i corsi pomeridiani. Appare opportuno, visti i risultati, indicare il *range* ottimale (fascia di colore rosso) per il corretto svolgimento dei compiti visivi negli ambienti scolastici prescritti dalle norme UNI EN 12464 (300 lux) e UNI 10840 (300 lux scuole medie superiori, 500 lux scuole serali per adulti). È stato inoltre simulato sulla superficie del banco il valore del *Daylight Factor* per ogni ora indagata relazionandolo con i valori di illuminamento esterno E (lux) forniti dalle centraline di rilevamento del DREAM riferiti all'anno 2005 [12]. Tali dati riguardano misurazioni effettuate con cadenza di 20 minuti, quelli utilizzati riguardano la media oraria.

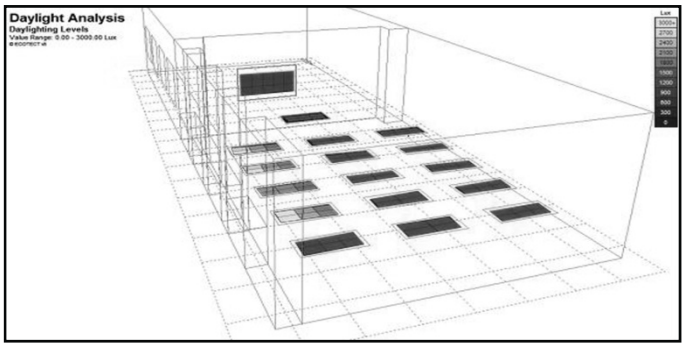


Figura 9. Livelli simulati di illuminamento (lux) sui banchi scolastici

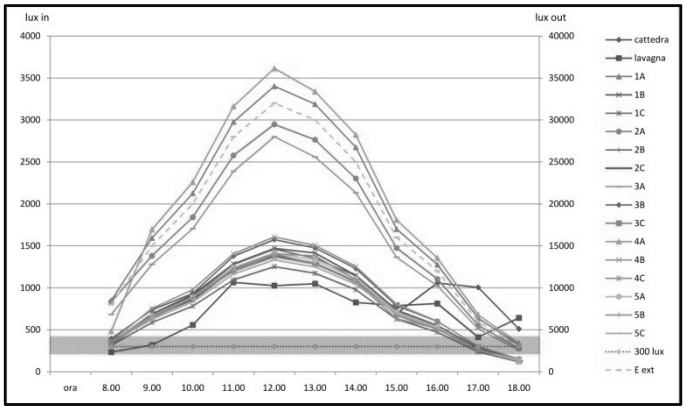


Figura 10. Livelli di illuminamento (lux) misurati in ogni *frame.*

L'APPROCCIO ADATTIVO

Per l'approccio adattivo è stato approntato un questionario apposito da somministrare agli alunni di ognuna delle classi indagate. Tale questionario è stato elaborato su un modello sviluppato dai ricercatori del Politecnico di Torino, ma adattato alle condizioni delle aule oggetto di studio [13]. Preliminarmente è stato effettuato un attento rilievo delle singole aule, al fine di rappresentare una pianta da allegare al questionario a risposta multipla, con la posizione indicativa degli arredi scolastici quali banchi, lavagna e cattedra. In linea di massima si sono individuate le problematiche che il singolo ambiente poteva presentare e sulla base di tali considerazioni sono state formulate le domande. Ad ogni alunno a cui viene somministrato il questionario viene richiesto di indicare, sulla pianta fornita, la postazione occupata solitamente durante lo svolgimento delle lezioni. Non si richiede età e sesso, poiché si tratta di somministrazione in età scolare e gli studenti risultano essere tutti di sesso maschile [14]. L'analisi soggettiva è stata effettuata allo scopo di cogliere l'espressione del grado di soddisfazione da parte degli utenti della scuola. A seguire è riportato il questionario che si divide in quattro parti (storia personale del soggetto, valutazione soggettiva, capacità di adattamento in funzione delle proprie preferenze, aspettative del soggetto):

- visus/presenza di affezioni di tipo visivo (astigmatismo, miopia);
- frequenza d'uso delle schermature, relazionata alla difficoltà di svolgere i compiti visivi (valutata nel caso di illuminamento naturale ed artificiale);
- valutazione soggettiva delle difficoltà nello svolgimento dei compiti visivi;
- soddisfacimento del controllo dei sistemi di schermature e di controllo dell'impianto.

Struttura del Test somministrato

a) Soffri di disturbi visivi (miopia, astigmatismo, ecc) ?

b) Come giudichi la quantità di luce presente sulla lavagna ?

c) Come giudichi la quantità di luce presente sul tuo banco (insufficiente – eccessiva) ?

d) Si verificano episodi di sovra-illuminamento sulla superficie del banco (es. difficoltà a leggere il libro) ?

e) Come giudichi le seguenti sorgenti di luce: finestra – corpi illuminanti all'interno dell'aula in relazione al disturbo provocato?

f) Come giudichi la distribuzione della luce all'interno dell'aula (molto disuniforme – molto uniforme) ?

g) Quanta importanza attribuisci al fatto di poter controllare l'illuminazione dell'ambiente ?

h) Come giudichi la quantità di luce presente sulla lavagna ?

i) Con che frequenza vi servite delle tende per schermare la luce che entra dalle finestre ?

j) Sei soddisfatto di come vedi ciò che l'insegnante scrive sulla lavagna ?

k) Durante l'anno ti capita di essere disturbato dall'eccessiva luminosità delle superfici vetrate ?

l) Nell'aula ti è possibile controllare l'illuminazione naturale ed artificiale dell'ambiente ?

- accensione e spegnimento dell'impianto di illuminazione artificiale
- controllo della radiazione luminosa tramite tapparelle o tende
- oscuramento completo dell'aula per le videoproiezioni

m) Durante l'anno è necessario ricorrere all'uso della luce artificiale?

Elaborazione dei dati rilevati

Il questionario è stato somministrato il giorno 27 maggio 2008 a partire dalle ore 9:00. La successiva fase di interpretazione dei dati è stata ottenuta tramite il sistema dello *scoring* delle singole parti del questionario, strutturando l'output dei dati sulla base di un sistema cromatico triplo, che assegna i valori in funzione della rispettiva qualità attesa. Il sistema di *scoring* complessivo deriva dalla combinazione dei risultati delle singole parti e ad ogni *scoring* complessivo ottenuto è associata una spiegazione della situazione del rischio stress visivo [15]. Il modello adattivo è stato sviluppato a partire dalla storia personale dei soggetti, dalla capacità di adattamento degli stessi nei confronti dell'ambiente luminoso ed inteso come comportamentale, dalle aspettative nei confronti del microclima luminoso, nonché dalle differenti considerazioni fatte dal soggetto in funzione della disponibilità stagionale di luce naturale, sia in termini di quantità che di qualità. Da questi si evince che gli studenti presentano notevoli difficoltà nello svolgimento dei compiti visivi, soprattutto per quelli che occupano postazioni prossime alle superfici vetrate, poiché sulla superficie del banco vi sono frequenti fenomeni di abbagliamento, a conferma dei dati ottenuti attraverso simulazione e dell'attendibilità delle risposte fornite. Nella Figura 11 che segue, è riportata la mappatura della risposta al quesito "*b) Come giudichi la quantità di luce presente sulla lavagna?"*, mentre, nella successiva Figura 10 è riportata una sintesi dei risultati ottenuti per ogni *cluster* indagato ed equivalente ad un questionario.

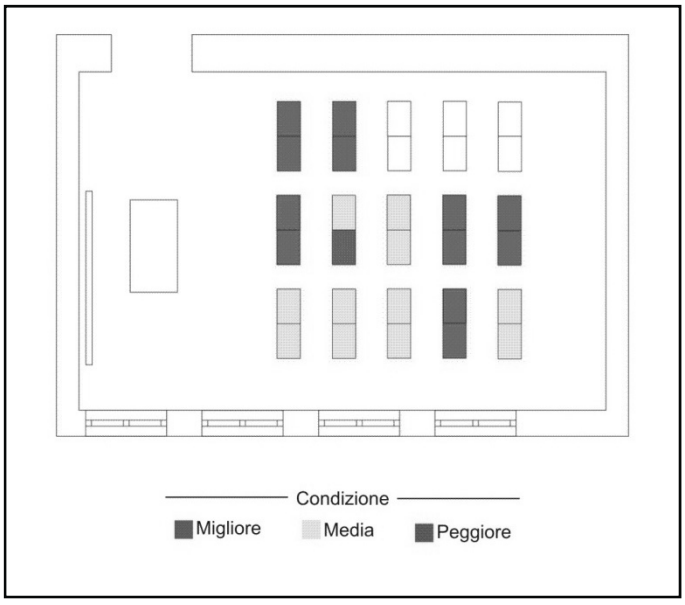


Figura 11. Mappatura cromatica ottenuta dalla interpretazione delle risposte al quesito "*b*" del questionario somministrato.

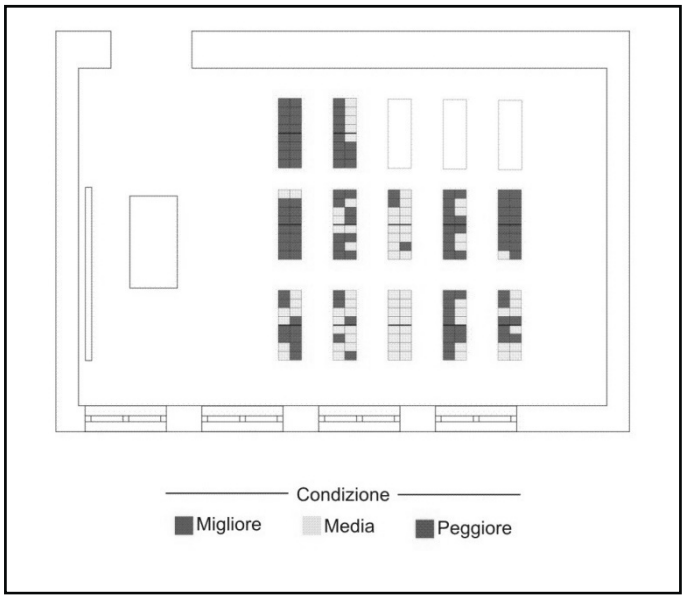


Figura 12. Mappatura cromatica di sintesi riguardante tutti i quesiti del questionario.

CONCLUSIONI

Al fine di indagare e valutare il microclima luminoso di un ambiente confinato, la metodologia qui proposta mostra un approccio maggiormente orientato al grado di soddisfacimento dell'utente, rispetto alla metodologia tradizionale, fatta di sole misurazioni strumentali. Nell'ambito della disciplina del benessere e del comfort legato alle condizioni microclimatiche del soggetto all'interno di un ambiente confinato è divenuta ormai prassi consolidata, integrare diverse metodologie, tra cui il modello statico tradizionale, il modello adattivo ed i rilievi delle principali grandezze caratteristiche. Dai risultati dello studio si evince chiaramente che l'ampia disponibilità di luce naturale, se non opportunamente controllata attraverso sistemi diversi, tali da permetterne un impiego ottimale, causa dei marcati fenomeni di sovra-illuminamento, con conseguenti stati di disagio a carico del visus. Appare opportuno, ai fini della completezza della trattazione, fornire delle indicazioni progettuali, basate su sistemi passivi atti al controllo dell'illuminazione naturale in ambiente lavorativo. In particolare, è possibile riscontrare nella letteratura di settore, delle soluzioni che è possibile adottare sia in fase di progettazione che di ristrutturazione. Le due soluzioni proposte, applicabili alla facciata dell'edificio, consistono rispettivamente nella schermatura tramite lamelle orizzontali e nel posizionamento di un aggetto esterno di 45 cm. Tali ipotesi progettuali sono state applicate al caso qui riportato, simulandone i livelli prestazionali in termini di illuminamento e di *daylight factor* ed hanno prodotto i seguenti risultati:

Con il posizionamento delle lamelle orizzontali si ottiene una frammentazione della penetrazione della luce, il valore del *daylight factor* (%) diminuisce notevolmente raggiungendo in alcuni punti valori ottimali. Dalle simulazioni si evince che a trarne giovamento sono soltanto le postazioni più distanti dalle superfici vetrate, mentre per le postazioni situate nella immediata prossimità delle stesse, si ottiene un peggioramento delle condizioni;

Con il posizionamento dell'aggetto esterno, invece, nonostante i livelli del *daylight factor* (%) rimangono approssimativamente uguali a quelli della condizione attuale, risulta un notevole aumento della qualità complessiva del microclima luminoso grazie alla uniformità dei valori.

Nelle figure 13-15 che seguono sono riportate rispettivamente le simulazioni dei livelli di DF (%) ed un grafico di confronto nel quale oltre alla variazione del valore di DF (%) in funzione della distanza dalla superficie vetrata, viene riportata per ognuna delle configurazioni proposte la relativa linea di tendenza (lineare).

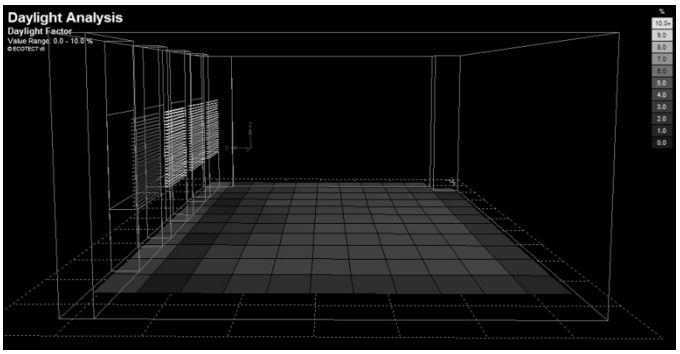


Figura 13. Simulazione del Dayligh Factor (%) in data 21 dicembre nella configurazione di schermatura con lamelle orizzontali alle aperture.

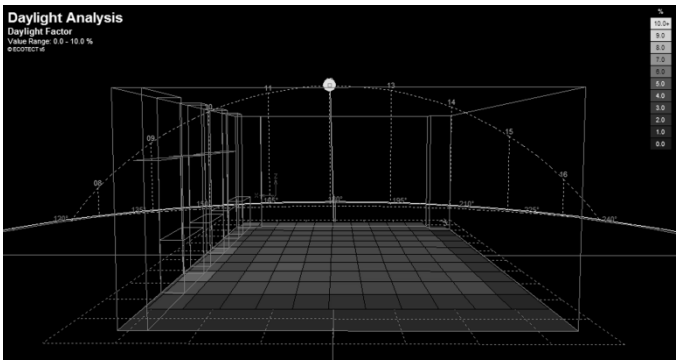


Figura 14. Simulazione del Daylight Factor (%) in data 21 dicembre nella configurazione con il posizionamento di un aggetto esterno.

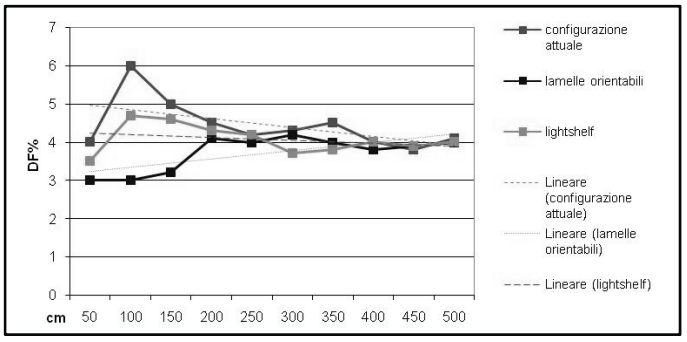


Figura 15. Grafico di confronto con le configurazioni proposte.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. C. Aghemo, B. Piccoli, Analisi delle condizioni illuminotecniche nei luoghi di lavoro, Gimle 2004.
2. UNI. Ente Italiano di Unificazione. 7730:2006. Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico

mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.
3. A. Milone, D. Milone, S. Pitruzzella, Analysis of the conformity and adaptation of university lecture halls to the illuminating engineering regulations: a case study, Proceedings of International Workshop and 7th Annex 45 Expert Meeting. Visual quality and energy efficiency in indoor lighting: today for tomorrow, March 2008, Rome;
4. UNI. Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI EN 12464 – 1/2004, Luce e illuminazione – Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni.
5. UNI. Ente Nazionale Italiano di Unificazione. 10840:2007. Luce e illuminazione – Locali scolastici – Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale.
6. I. Costarelli, R. Mariani, M. Vergoni, Le nuove normative nel settore illuminotecnico – confronto critico e applicazioni delle verifiche in ambienti scolastici, 6° Congresso Nazionale CIRIAF, Perugia 2006.
7. UNI. Ente Nazionale Italiano di Unificazione. 15193:2008. Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting.
8. Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio sul rendimento energetico nell'edilizia del 16 dicembre 2002. Gazzetta ufficiale della comunità europea.
9. Linee Guida Nazionali per la Certificazione energetica degli edifici – 10 luglio 2009.
10. A. Milone, D. Milone, S. Pitruzzella. Simulation of daylight levels for the determination of visual comfort in large spaces. In Proceedings of 10th International Building Performance Simulation Association (IBPSA) Conference and Exhibition - Building Simulation 2007. Tsinghua University, Beijing, China.
11. C. Buratti, A. Milone, S. Pitruzzella, P. Ricciardi, Determinazione degli indici PMV/PPD attraverso misure strumentali e questionari nel modello adattivo, VI Congresso Internazionale CIRIAF, Perugia, 2006.
12. Dati meteo rilevati nell'anno 2005 - Dipartimento Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM), Università degli Studi di Palermo.
13. Aghemo C., L'illuminazione artificiale dei posti di illuminazione interni secondo la UNI EN 12464-1/2004, In: Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro. Verso un manuale di buona pratica, dBA (ITA), Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro. Verso un manuale di buona pratica, Bologna 14 settembre, pp. 4-25, 2005, Vol. 1.
14. C. Buratti, U. Di Matteo, C. Simoncini, Risultati di un'analisi conoscitiva sul comfort ambientale in particolari luoghi di lavoro: aspetti microclimatici ed illuminotecnici, 6° Congresso Nazionale CIRIAF, Perugia 2006.
15. Wang, R.; Lai, L.; Wang, S. Further Development and Validation of Empirical Scoring Functions for Structure-Based Binding Affinity Prediction. J. Comput.-Aided Mol. Des. 2002.

IL BENESSERE TERMOIGROMETRICO NEGLI AMBIENTI DI LAVORO: ANALISI DI RISULTATI SPERIMENTALI ED ELABORAZIONE DI QUESTIONARI

Autori: Paola Ricciardi*, Cinzia Buratti**, Alessandra Bonavita*, Filippo Gianelli*

* CIRIAF - Sez. Fisica Tecnica ed inquinamento ambientale - - Università degli Studi di Pavia
** CIRIAF - Sez. Fisica Tecnica ed inquinamento ambientale - Università degli Studi di Perugia

SOMMARIO

Il benessere termoigrometrico negli ambienti di lavoro è un ambito di ricerca scientifica di grande importanza per le ripercussioni che ha sulla salute e sulla produttività degli utenti nell'edificio e, indirettamente, sul risparmio energetico ottenibile attraverso una più oculata gestione delle risorse. E' scientificamente provato come un ambiente di lavoro confortevole possa migliorare sensibilmente le condizioni di lavoro delle persone, incidendo positivamente sulla produttività; l'interesse dell'attuale dibattito scientifico in materia è incentrato sulle modalità e sui parametri con i quali operare per migliorare il livello di comfort.

L'attuale normativa in materia, la norma UNI EN ISO 7730, relativa alle condizioni di benessere termoigrometrico in ambienti termici moderati, si basa su un modello statico che vede gli occupanti di un ambiente come soggetti passivi di scambio termico.

Nello specifico, il presente lavoro di ricerca ha come oggetto l'analisi del benessere termoigrometrico in ambienti destinati ad uffici di tipo "open-space" e prevede una campagna sperimentale di rilievo dei parametri termoigrometrici ambientali. In precedenti studi era stato elaborato un apposito questionario a risposta multipla, comprensivo di alcune informazioni necessarie all'applicazione del tradizionale modello statico e di altre del modello adattivo, proposto nella ISO/DIS 7730/2003 e nell'ASHRAE 55/P, che è stato applicato a diversi casi.

In questo lavoro il questionario è stato utilizzato in una campagna sperimentale svoltasi presso cinque sedi di un importante gruppo bancario, da aprile a luglio 2009. Contestualmente è stato effettuato il monitoraggio delle condizioni termoigrometriche, con strumentazione specifica adatta allo scopo ed in grado di calcolare i principali indici del benessere previsti da normative a livello internazionale, europeo e italiano.

I dati rilevati mediante i questionari e le strumentazioni sono stati confrontati tra loro; inoltre i parametri, utili ai fini dell'applicazione dei modelli adattivi, sono stati elaborati secondo l'approccio statistico suggerito dalle recenti normative in materia.

1. INTRODUZIONE

Lavori scientifici precedenti [1, 2, 3, 4, 5, 6] sviluppati dai gruppi di ricerca di Fisica Tecnica del Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Ambientale dell'Università di Pavia e dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia, avevano avuto come oggetto il benessere termoigrometrico all'interno di aule universitarie. La ricerca è stata estesa ad ambienti confinati ad uso ufficio, con caratteristiche di "open space". Nello specifico, nel presente lavoro, sono riportati i risultati di analisi sperimentali e soggettive, effettuate da aprile a luglio 2009 in cinque ambienti lavorativi site in alcuni capoluoghi lombardi:

- Stabile 1- ufficio a – (ufficio amministrativo);
- Stabile 2- ufficio b – (call center);
- Stabile 3 - SGR (intermediazione finanziaria)
- Stabile 4 – ufficio c (back-office)
- Stabile 4 – ufficio d - (programmazione informatica)

2. METODOLOGIA D'INDAGINE

Indagini sperimentali

Le indagini sperimentali sono state effettuate con una metodologia già utilizzata in precedenti campagne di misura [1, 2, 3, 4, 5, 6]. La metodologia di misura si basa sul rilievo dei parametri termoigrometrici ambientali previsti dalla UNI-EN-ISO 7730/1994, dalla ISO-DIS 7730/2003, dalla UNI-EN-ISO 10551/2002 e dall'ASHRAE Standard 55/1992, utili ai fini di una valutazione del comfort sia attraverso il metodo tradizionale sia attraverso il nuovo approccio adattivo. La centralina di acquisizione Babuc A è stata ubicata in più postazioni all'interno dei diversi ambienti di lavoro, suddividendo lo spazio in aree di influenza. Per ciascun rilievo, sono state predisposte da una a tre postazioni di misura, al fine di valutare l'uniformità delle condizioni termoigrometriche all'interno del medesimo ambiente. Nella medesima giornata le misure sono state effettuate sia al mattino sia al pomeriggio. Dalla figura 1 alla figura 5 sono indicate le postazioni di misura nei diversi luoghi di lavoro analizzati.

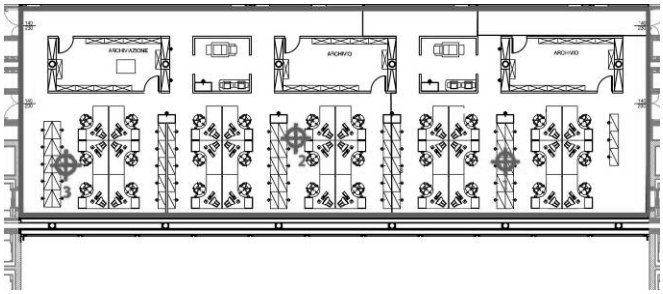


Figura 1: Pianta ufficio a – ufficio amministrativo, con indicazione delle postazioni di misura

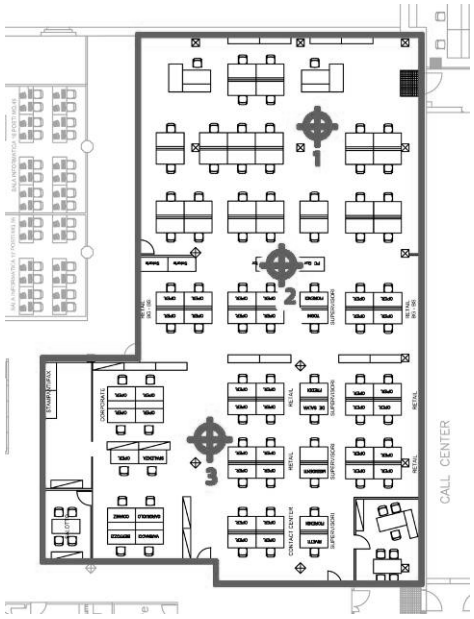


Figura 2: Pianta ufficio b – (call center), con indicazione delle postazioni di misura

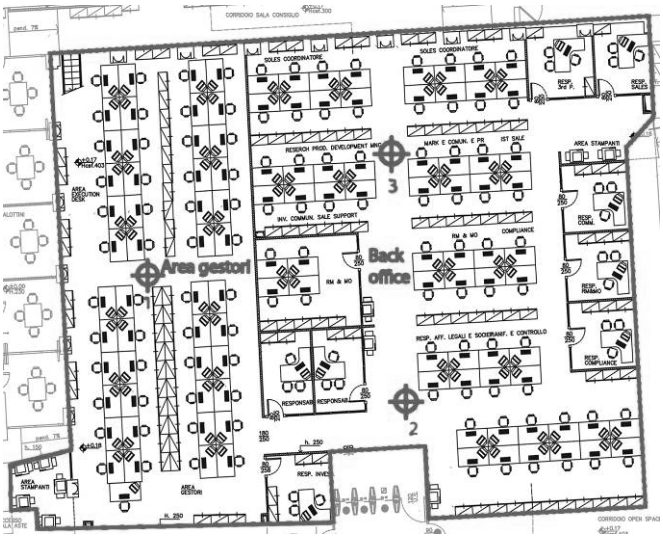


Figura 3: Pianta SGR - Intermediazione Finanziaria, con indicazione delle postazioni di misura

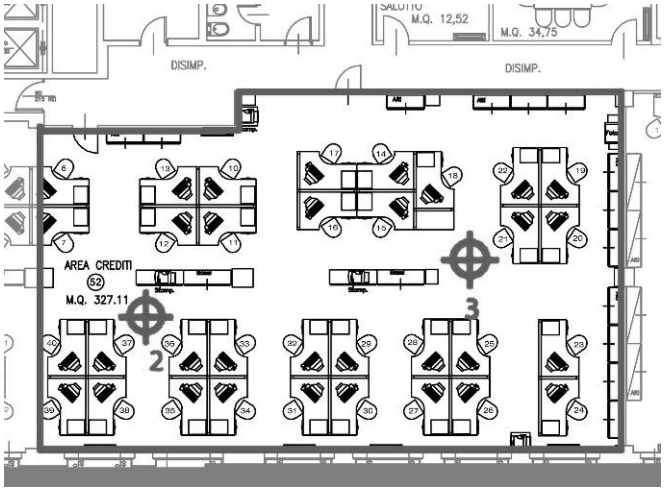


Figura 4: Pianta dell'ufficio c (back- office), con indicazione delle postazioni di misura

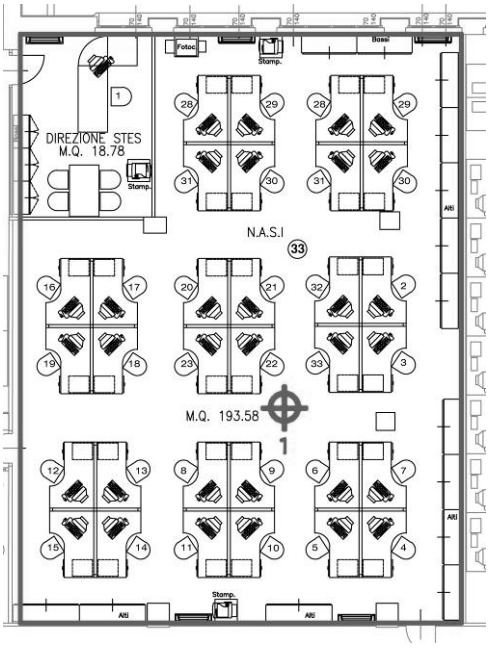


Figura 5: Pianta dell'ufficio d (programmazione IT), con indicazione delle postazioni di misura

Contestualmente alle rilevazioni nell'ambiente interno sono state effettuate misure in esterno mediante una centralina di rilevamento "Delta Ohm DO9847".

Nell'ambiente interno sono state misurate le seguenti grandezze:

- Temperatura di bulbo secco T *[°C]*;
- Temperatura di bulbo umido T_u *[°C]*;
- Velocità dell'aria v_a *[m/s];*
- Temperatura media radiante T_{mr} *[°C]*;
- Temperatura del pavimento T_{pav} *[°C]* ;
- Temperatura dell'aria a livello delle caviglie (0,1 m dal suolo) T_{cav} *[°C]*.

Attraverso tali grandezze sono stati calcolati:
- Umidità relativa dell'aria *UR[%]*;
- PMV (Voto Medio Previsto) ;
- PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) *PPD [%]*;
- Intensità della turbolenza *TU [%]*;
- PPD per gradiente termico verticale *PPD [%]*;
- PPD per temperatura del pavimento PPD [%];
- PPD per correnti d'aria PPD [%].

All'esterno sono state misurate le seguenti grandezze:
- Umidità relativa dell'aria UR_{est} *[%]*;
- Temperatura T_{est} *[°C]*.

Analisi soggettiva dai questionari

Parallelamente all'acquisizione dei dati mediante la strumentazione, è stata sviluppata un'analisi di tipo adattivo, basata sull'interazione attiva tra soggetto ed ambiente.

Il questionario utilizzato deriva da un'integrazione di quello contenuto nella norma UNI-EN-ISO 10551 [7], con ulteriori domande connesse alle opportunità per gli occupanti di poter controllare il loro intorno termico e della soddisfazione derivante da ciò, per valutare l'influenza dell'aspetto comportamentale nell'adattamento personale all'ambiente termico [1, 2, 3, 4].

3. ANALISI DEI RISULTATI

Le principali caratteristiche degli ambienti oggetto di studio sono riportate nelle tabelle 1 e 2.

E' stata calcolata la media dei parametri misurati dai rilievi nelle diverse postazioni, della durata di trenta minuti ciascuno, ed i valori medi globali fra le diverse postazioni delle principali grandezze utili ai fini della valutazione delle condizioni di benessere (T_{est} [°C], UR_{est} [%], T [°C], UR [%],T_{mr} [°C], v_a [m/s], M [W/m^2], I_{cl} [clo]). Le elaborazioni dei parametri sperimentali oggettivi acquisiti nelle diverse sedi bancarie sono riportate nelle tabelle 3 e 4. Nello specifico i valori di metabolismo e resistenza al vestiario sono stati calcolati da indicazioni dei questionario da [8] ed i valori di PPD e PMV riferiti ai valori di clo minimo medio e massimo. Una sintesi dei parametri più significativi, ottenuti dall'analisi dei questionari presso le diverse sedi, è inoltre riportata nelle tabelle 5 e 6.

Tabella 1: Caratteristiche degli stabili 1 e 2 (uffici a e b)

Sede Bancaria- Uffici di Direzione Centrale	**Ufficio a (ufficio amministrativo)**	**Ufficio b (call center)**
Orientamento facciata esterna	SE	S
Area pavimento	530 m^2	365 m^2
Altezza netta	3,30 m al controsoffitto	2,80 m al controsoffitto
Volume	1.750 m^3	1020 m^3
Tipo di parete	pannelli prefabbricati in calcestruzzo	vetrata con struttura a montanti e traversi e sistema di frangisole esterno
Finestre	18 moduli da 1,80m x 0,75m. Superficie totale 24,3 m^2	86 m^2
Altre superfici vetrate	non presenti	non presenti
Tipo di costruzione della finestra	alluminio - vetro doppio - senza taglio termico	doppio serramento con intercapedine percorribile e vetrocamera con struttura in alluminio
Finestra aperta	no	No
Percentuale di apertura degli schermi	non presenti	Alette orizzontali fisse con interasse di circa 80 cm
Tipo di impianto	riscaldamento a pavimento, raffrescamento a fan coil	centralizzato, aria primaria da soffitto microforato non regolabile e fan coil in ogni ufficio
Accensione impianto	si	Si
Tipo e numero di terminali di immissione	4 fan coil,	soffitto microforato
Numero di questionari	75	42
Numero di persone presenti durante i rilievi	circa 35 contemporaneamente	circa 25 contemporaneamente
Tipo e numero di macchine	80 pc, 3 fotocopiatrici, 80 telefoni	30 pc, 30 telefoni
Tipo di impianto di illuminazione	tubi fluorescenti uniforme	neon a tubo fluorescente singolo
Numero di apparecchi illuminanti	70 corpi illuminanti (3 tubi per ogni corpo)	88 moduli rettangolari a tubo singolo
Accensione apparecchi illuminanti	si	Si
Numero di porte interne ed esterne	1 esterna, 4 interne	2 interne
Porta aperte/chiusa	chiuse	aperte

Stabile 1- ufficio a – (ufficio amministrativo)

Al mattino gli occupanti hanno avvertito una sensazione termica spostata verso il freddo (tabella 3). Tale condizione è decisamente più evidente nel campione femminile, che presenta un PMV medio pari a -0.19, con un valore di dispersione massimo di +0.36 e minimo di -0.97, mentre è meno evidente nel campione maschile, il quale presenta un PMV superiore, pari a 0,18. Al pomeriggio si assiste ad un miglioramento della situazione per gli uomini, con valori di PMV pari a 0.11, e peggioramento per le donne, con valori di PMV di -0,37. Tale sensazione è da imputare principalmente all'aumento della temperatura T e della temperatura media radiante T_{mr} di circa 0,5 °C. Di più difficile interpretazione risulta la condizione relativa alla velocità dell'aria (tabella 5): nonostante i risultati delle misure indicano una velocità dell'aria pressoché nulla in tutte le postazioni (0,00 m/s), sia al mattino sia al pomeriggio, la risposta degli occupanti indica un elevato indice di insoddisfazione sia per l'accettabilità sia per la preferenza del movimento dell'aria.

Tabella 2: Caratteristiche degli stabili 3 e 4 (uffici SGR, c e d)

Sede Bancaria Uffici di Direzione Centrale	**SGR (interm. finanz.)**	**Ufficio c (programm. IT)**	**Ufficio d (back office)**
Orientamento facciata esterna	S	N	S
Area pavimento	735 m^2	195 m^2	202 m^2
Altezza netta	4,00 m al controsoffitto	2,75 m	2,75 m
Volume	2.950 m^3	535 m^3	555 m^3
Tipo di parete	muratura	muratura a cassa vuota con rivestimento esterno in marmo	muratura a cassa vuota con rivestimento esterno in marmo
Superficie finestre	non presenti	21,5 m^2	19,8 m^2
Altre superfici vetrate	non presenti	non presenti	non presenti
Tipo di costruzione della finestra	non presenti	alluminio a vetro singolo	Alluminio a vetro singolo
FInestra aperta	non presenti	no	no
Percentuale di apertura degli schermi	non presenti	100% aperti	3 finestre con 100% aperti 3 finestre con 50% aperti
Tipo di impianto	a tutt'aria	aria primaria canalizzata, fan coil controllati a zona	aria primaria canalizzata, fan coil controllati a zona
Accensione impianto	si	si	si
Tipo e numero di terminali di immissione	32 bocchette circolari nel back office, 16 nell'area gestori	8 bocchette circolari per aria primaria, 4 fan coil	12 bocchette circolari per aria primaria, 6 fan coil
Numero di questionari	120	27	50
Numero di persone presenti durante i rilievi	circa 60 contemporaneamente	circa 15 contemporaneamente	circa 30 contemporaneamente
Tipo e numero di macchine	120 pc, 8 fotocopiatrici, 120 telefoni	45 pc, 2 stampanti, 20 telefoni	60 pc, 3 stampanti, 1 fotocopiatrice, 30 telefoni
Tipo di impianto di illuminazione	neon tubo fluorescente, a gruppi di 4	neon, tubo fluorescente singolo	neon, tubo fluorescente singolo
Numero di apparecchi illuminanti	64 x 4 back office, 24 x4 area gestori	40	40
Accensione apparecchi illuminanti	no back office, si area gestori	si	si
Numero di porte interne ed esterne	14 interne, 1 esterna	2 interne sul corridoio	1 interna sul corridoio
Porta aperte/chiusa	aperte interne, chiuse esterne	1 aperta, 1 chiusa	aperta

Tabella 3: Dati riassuntivi delle indagini sperimentali presso gli uffici a e b

Sede Bancaria	***Ufficio a***		***Ufficio b***	
Grandezza	*MAT*	*POM*	*MAT*	*POM*
T_{est} ***[°C]***	-	-	-	-
UR_{est} ***[%]***	-	-	-	-
T [°C]	22,1	22,8	24,77	24,92
UR [%]	56,2	55,3	57,99	58,59
T_{mr} ***[°C]***	22,3	22,9	25,40	25,72
v_a ***[m/s]***	0,00	0,00	0,08	0,09
M [W/m²] U	74,8	74,1	73	75,5
Icl (clo) U	0,87	0,74	0,58	0,56
M (W/m²) D	76	70,6	72,2	71,7
Icl [clo] D	0,62	0,55	0,43	0,44
PMV U *clo min*	-0,26	-0,24	+0,24	+0,29
PMV U *clo med*	+0,18	+0,11	+0,42	+0,50
PMV U *clo max*	+0,53	+0,58	+0,96	+0,99
PMV D *clo min*	-0,97	-1,10	-0,24	+0,08
PMV D *clo med*	-0,19	-0,37	+0,14	+0,22
PMV D *clo max*	+0,36	+0,38	+0,53	+0,62
PPD U [%] *clo min*	6,43	6,46	6,97	7,26
PPD U [%] *clo med*	5,73	5,25	9,41	10,71
PPD U [%] *clo max*	10,92	12,07	24,67	26,24
PPD D [%] *clo min*	25,19	30,64	7,35	5,68
PPD D [%] *clo med*	5,86	8,01	6,22	6,42
PPD D [%] *clo max*	7,75	7,98	15,36	13,31

Tabella 4: Dati riassuntivi delle indagini sperimentali presso gli uffici SGR, c e d

	SGR		***Ufficio c***		***Ufficio d***	
Grandezza	*MAT*	*POM*	*MAT*	*POM*	*MAT*	*POM*
T_{est} ***[°C]***	-	-	-	-	-	-
UR_{est} ***[%]***	-	-	-	-	-	-
T [°C]	24,89	25,1	25,4	25,2	26	26,2
UR [%]	58,1	58,5	47	48	45,7	48,5
T_{mr} ***[°C]***	25,5	25,8	26,6	26,4	26,95	27,28
v_a ***[m/s]***	0,024	0,021	0,00	0,00	0,08	0,07
M [W/m²] U	-	-	72,5	70,6	70,9	70,6
Icl (clo) U	0,69	0,57	0,77	0,45	0,57	0,52
M (W/m²) D	-	-	72,2	70	70	70
Icl [clo] D	0,49	0,42	0,43	0,42	0,4	0,40
PMV U *clo min*	-0,26	-0,24	+0,44	+0,28	+0,41	+0,52
PMV U *clo med*	+0,18	+0,11	+0,83	+0,67	+0,65	+0,67
PMV U *clo max*	+0,53	+0,58	+0,94	+0,97	+0,92	+0,97
PMV D *clo min*	-0,97	-1,10	+0,15	+0,13	+0,38	+0,19
PMV D *clo med*	-0,19	-0,37	+0,23	+0,21	+0,38	+0,47
PMV D *clo max*	+0,36	+0,38	+0,29	+0,26	+0,38	+0,63
PPD U [%] *clo min*	6,43	6,46	9,08	6,63	8,68	10,73
PPD U [%] *clo med*	5,73	5,25	19,47	14,52	14,14	14,48
PPD U [%] *clo max*	10,92	5,25	23,59	24,68	23,2	25,04
PPD D [%] *clo min*	25,19	12,07	5,51	5,35	8,28	5,84
PPD D [%] *clo med*	5,86	30,64	6,12	5,89	8,28	9,75
PPD D [%] *clo max*	7,75	8,01	6,71	6,42	8,28	13,33

Probabilmente tale risposta è legata al discomfort termico rilevato, poiché la temperatura troppo bassa potrebbe accrescere la sensazione correlata al movimento dell'aria. Gli elevati valori degli indici termici di insoddisfazione, preferenza e fastidio, soprattutto nel campione femminile, sottolineano come sia difficile sopportare le condizioni termiche esistenti: la temperatura percepita dagli utenti è molto bassa e le misure, indicando una temperatura media che oscilla tra i 22,1 °C e 22, 8 °C confermano questa sensazione.

Per quanto riguarda i controlli ambientali a disposizione degli utenti, la maggior parte dei presenti presenta un elevato grado di insoddisfazione dovuto alla possibilità pressoché nulla di interagire con la regolazione dell'impianto e con l'apertura delle finestre.

Stabile 2- ufficio b – (call center)

Al mattino gli occupanti avvertono una sensazione termica spostata verso il leggero caldo (tabella 3) più rilevante nel campione maschile (+0,42) che in quello femminile (+0,14). Al pomeriggio si assiste ad un leggero peggioramento della situazione, con valori di PMV pari a +0,50 per gli uomini e +0,22 per le donne.

Stabile 3 - SGR (intermediazione finanziaria)

Al mattino gli occupanti avvertono (tabella 4) una sensazione termica spostata, verso il leggero caldo nel campione maschile (PMV = 0,18) e verso il leggero freddo

(PMV = -0.19) in quello femminile; quest'ultimo è caratterizzato da una maggiore differenziazione fra le risposte che varia da un valore minimo di -0,97 ed un valore massimo di +0.36.

Al pomeriggio si assiste ad un leggero peggioramento della situazione per le donne (PMV = -0,37), ma non per gli uomini (PMV = 0,11). Tale situazione è forse da imputare all'aumento della temperatura T e della temperatura media radiante T_{mr} di circa 0,3 °C.

Tabella 5: Sintesi dei parametri più significativi ottenuti dall'analisi dei questionari presso gli stabili 1 e 2

	Ufficio a		*Ufficio b*	
Grandezza	***MAT***	***POM***	***MAT***	***POM***
n° questionari	32	43	21	20
Età media soggetti	27	25	36,5	36
PMV	-1,38	-0,35	+0,32	+0,58
Scost. PMV	± 1,17	± 0,99	±0,39	±0,96
Insodd. Term. [%]	81,3	51,2	68	79,1
Prefer. Termica [%]	90,6	48,8	65,3	70,8
Inacc. termica [%]	53,1	32,6	25	31,2
Fast. Termico [%]	71,9	55,8	54	70,8
Inacc. v_a [%]	59,4	37,2	56,5	69
Prefer. v_a [%]	78,1	58,1	73,3	63
Inacc. GTV [%]	50	20,9	31,9	33
Prefer. GTV [%]	62,5	34,9	59,7	39,5
Ins. cont. amb. [%]	81,3	79,1	59,7	75

Gli elevati valori degli indici termici di insoddisfazione (tabella 6), preferenza e fastidio, soprattutto nel campione femminile, sottolineano come sia difficile sopportare le condizioni termiche esistenti: tale disagio è ulteriormente aggravato dalla presenza di uno o più computers e schermi ad ogni postazione di lavoro, che determinano un aumento di temperatura proprio in prossimità dell'utente.

Per quanto riguarda i controlli ambientali a disposizione degli utenti, la maggior parte dei presenti presenta un elevato grado di insoddisfazione dovuto alla possibilità pressoché nulla di interagire con la regolazione dell'impianto.

Il disagio espresso dagli utenti tramite i questionari è attribuibile, in parte, ad una condizione psicologica negativa dovuta alla totale assenza di finestre nell'ambiente di lavoro.

La mancanza di illuminazione naturale, sostituita con quella artificiale e costante, priva gli occupanti della necessaria percezione del passare del tempo, estraniandoli dalla realtà ed influendo negativamente sulla loro sensazione di benessere.

Stabile 4 – ufficio c (back-office)

Al mattino gli occupanti avvertono (tabella 4) una sensazione termica spostata verso il caldo elevato tanto nel campione femminile (+0,23) quanto, soprattutto, in quello maschile (+0,83). La variazione tra valori minimi e massimi di PMV è di +0.5 nel campione maschile e di +0.14 nel campione femminile.

Al pomeriggio la situazione rimane pressoché inalterata, con un leggero miglioramento, con valori di PMV pari a +0,67 per gli uomini e +0,21 per le donne, con variazione di valori per gli uomini più elevati (+0,69) rispetto al mattino e pari per le donne (+0.13).

Tabella 6: Sintesi dei parametri più significativi ottenuti dall'analisi dei questionari presso gli stabili 3 e 4

	SGR		*Ufficio c*		*Ufficio d*	
Grandezza	***MAT***	***POM***	***MAT***	***POM***	***MAT***	***POM***
n° questionari	63	58	21	29	13	14
Età media soggetti	34,5	34	38	36	36	37,5
PMV	+0,32	+1,17	+1,39	+1,54	+1,32	+1,12
Scost. PMV	±0,77	±1,04	±0,92	±1,00	±1,00	±1,40
Insodd. Term. [%]	62,8	83,7	94,5	87,5	86,3	66,6
Prefer. Termica [%]	60,9	70	91,6	87,5	86,3	58,3
Inacc. termica [%]	53	57,7	94,5	73,5	43,2	58,3
Fast. Termico [%]	80,8	82	97,2	96	86,3	66,6
Inacc. v_a [%]	58,4	71,6	86,1	77,5	47,7	62,5
Prefer. v_a [%]	80	91,5	75	96	86,3	91,6
Inacc. GTV [%]	47	46,7	27,8	53	52,2	25
Prefer. GTV [%]	49	53,5	61,2	71,5	81,8	25
Ins. cont. amb. [%]	86,9	87,8	91,6	83,5	52,2	79,1

Stabile 4 – ufficio d - (programmazione informatica)

Al mattino gli occupanti avvertono una sensazione termica spostata verso il caldo elevato (tabella 4) tanto nel campione femminile (+0,38) quanto, soprattutto, in quello maschile (+0,65). La variazione tra valori minimi e massimi di PMV è di +0.51 nel campione maschile e nulla nel campione femminile.

Al pomeriggio la situazione rimane pressoché inalterata, con un leggero peggioramento, con valori di PMV pari a +0,67 per gli uomini e +0,47 per le donne, con variazione di valori per gli uomini più bassi (+0,45) rispetto al mattino e superiore per le donne (+0.44).

Gli elevati valori degli indici termici di insoddisfazione, preferenza e fastidio, sottolineano come sia difficile sopportare le condizioni termiche esistenti: in analogia allo stabile 3, tale disagio è ulteriormente aggravato dalla presenza di pc, monitor e apparecchiature elettroniche ad ogni postazione di lavoro che determina un aumento di temperatura proprio in prossimità dell'utente.

Per quanto riguarda i controlli ambientali a disposizione degli utenti, la maggior parte dei presenti presenta un elevato grado di insoddisfazione dovuto alla possibilità molto limitata di interagire con la regolazione dell'impianto.

4. CONFRONTO ANALISI OGGETTIVE E SOGGETTIVE

In figura 6 è riportato il confronto tra il PMV calcolato a partire dai dati sperimentali e quello ricavato dalle elaborazioni dei questionari, dove si osserva che la correlazione è molto poco significativa.

Il risultato conferma le analisi precedentemente effettuate su un'altra tipologia di ambienti confinati [1], cioè che entrambe le sensazioni, sia di caldo sia di freddo, sono amplificate dai questionari rispetto ai rilievi strumentali (per i valori di PMV dai rilievi strumentali si ottengono sempre valori più alti, se positivi, o più bassi, se negativi).

In figura 7 si osserva invece un'ottima correlazione tra il PMV ed il PPD dei questionari con quello sperimentale.

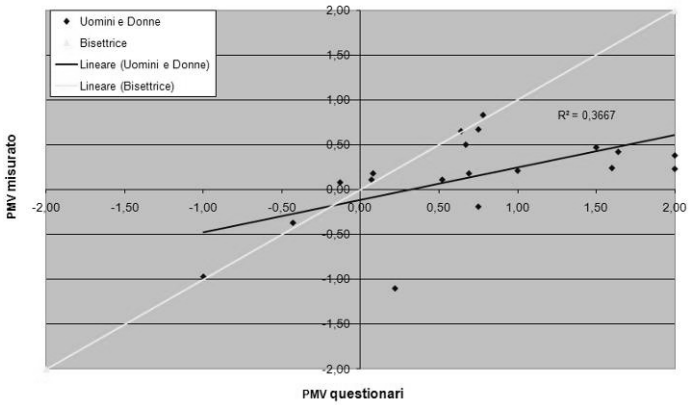


Figura 6- Confronto tra PMV dei questionari e PMV sperimentali

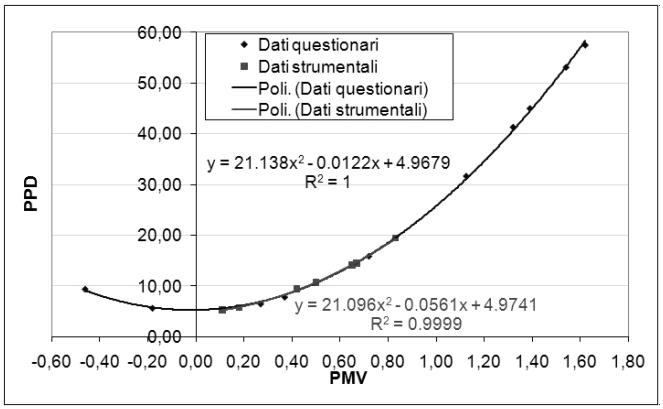


Figura 7- Confronto tra PMV e PPD dei questionari e dei dati sperimentali

5. CONCLUSIONI

I risultati mostrano che, sebbene sulla base delle misure effettuate i parametri rientrino quasi sempre negli intervalli consigliati dalla normativa, i questionari evidenziano condizioni più critiche. Infatti, spesso, solo una modesta percentuale di occupanti si trova a proprio agio con l'intorno termico ed i giudizi espressi dai soggetti interessati amplificano la situazione di leggero caldo presente mediamente in tutti i casi esaminati.

Questa discrepanza è in parte dovuta alla scarsa possibilità da parte degli occupanti di intervenire sulle condizioni dell'ambiente, in parte allo scarso movimento dell'aria, cui è correlata anche l'insoddisfazione per il gradiente termico verticale.

NOMENCLATURA

D = donne;
GTV = gradiente termico verticale;
I_{cl} = isolamento termico del vestiario (clo, m^2K/W);
M = metabolismo (met, W/m^2);
PPD = percentuale prevista di insoddisfatti (%);
PMV = voto medio previsto;
T = temperatura (°C);
U = uomini;
UR = umidità relativa (%);
v = velocità (m/s).
Pedici:
a = aria;
est = esterno;
mr = media radiante;

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia per la preziosa collaborazione il dott. Gianfranco Feroldi, responsabile del Servizio Prevenzione del Gruppo Bancario.

BIBLIOGRAFIA

1. Buratti C., Ricciardi P., "Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: correlation between experimental data and mathematical models", Building and Environment 44 (2009), 674–687.
2. C. Buratti, P. Ricciardi, "Thermal- hygrometry comfort in university classrooms: experimental results in north and central Italy Universities conducted with new methodologies based on the adaptive model", 3rd International Building Physics/Science, Montreal, Canada, 27-31 Agosto 2006, pag. 765-773, Atti su CD ISBN 10 0-415-41675-2.
3. C. Buratti, P. Ricciardi, C. Simoncini, "Il benessere termoigrometrico nelle aule universitarie: primi risultati di una campagna sperimentale presso le Università di Perugia e Pavia effettuata secondo nuove metodologie basate sul modello adattivo", V Convegno Nazionale del Centro Interuniversitario di Ricerca sugli Agenti Fisici, Perugia, 8 - 9 Aprile 2005, pag. 73-80, Atti su CD ISBN 88-89422-43-2.
4. C. Buratti, A. Milone, D. Milone, S. Pitruzzella, P. Ricciardi., **"**Determinazione degli indici PMV/PPD attraverso misure strumentali e questionari nel modello adattivo", VI Convegno Nazionale del Centro Interuniversitario di Ricerca sugli Agenti Fisici, Perugia, 7 - 8 Aprile 2006, pag 147-152, Atti su CD ISBN 88-6074-018-5.
5. C. Buratti, P. Ricciardi, M.Vergoni, **"**Recupero di una cavita' naturale: indagine preliminare su aspetti microclimatici e illuminotecnici proposta di soluzioni ecocompatibili**",** VII Convegno Nazionale del Centro Interuniversitario di Ricerca sugli Agenti Fisici, Perugia, 4 - 6 Aprile 2007, pag. 209-216, Atti su CD ISBN 978-88-6074-089-2.
6. C. Buratti, P. Ricciardi, "Comfort termoigrometrico in ambienti interni: correlazioni tra valori sperimentali e modelli matematici" 62° Congresso Nazionale ATI (Associazione Termotecnica Italiana), 11-14 settembre 2007, Salerno, pag. 169-174, ISBN 978-88-87998-77-1.
7. UNI-EN-ISO 10551– Ergonomia degli ambienti termici –Valutazione dell'influenza dell'ambiente termico mediante scale di giudizio soggettive. Gennaio 2002.
8. UNI EN ISO 7730- Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale- 2006.
9. Mui K. W. H., Chan W. T. D., Adaptive comfort temperature model of air conditioned building in Hong Kong, Building and Environment 2003, 38: 837–852.

COMFORT TERMOIGROMETRICO NEGLI IMPIANTI NATATORI. INDAGINE SPERIMENTALE ED ANALISI CRITICA SULL'APPLICAZIONE DEI REQUISITI PRESCRITTI DALLA LEGISLAZIONE NAZIONALE

Daniele Sepulcri[1], Roberto Spinazzè[1]

[1]ARPAV – Dipartimento Provinciale di Venezia, via Lissa 6 – 30173 Mestre-Venezia

SOMMARIO

Su incarico della Regione Veneto è stata condotta una campagna di misura inerente le caratteristiche microclimatiche nelle piscine pubbliche della Regione. In 24 impianti natatori sono stati condotti monitoraggi ed analisi multiparametriche puntuali, relative a parametri microclimatici quali temperatura e velocità dell'aria, temperatura dell'acqua, umidità, temperatura radiante. E' stato così possibile ottenere un quadro conoscitivo dello stato di fatto sia in relazione al rispetto dei requisiti previsti dalla vigente normativa nazionale (Accordo Stato-Regioni del 16 gennaio 2003), sia in relazione ai criteri di benessere temoigrometrico indicati da standard tecnici nazionali e internazionali, ponendo attenzione, oltre che al comfort per gli utenti, anche alle condizioni di igiene e sicurezza dei lavoratori che operano nelle piscine. Si è proceduto quindi ad una riflessione critica sulla giustificazione e sulla congruità dei requisiti previsti dalla norma, anche alla luce delle attuali conoscenze scientifiche.

INTRODUZIONE

Con l'Accordo Stato Regioni del 16 gennaio 2003 [1], sono state introdotte per la prima volta a livello nazionale norma che stabiliscono requisiti per l'igiene degli impianti natatori. A seguito dell'approvazione dell'Accordo, la Regione Veneto ha attuato una serie di azioni tese a favorire il recepimento dei contenuti generali dell'Accordo stesso da parte degli operatori del settore e a conoscere lo stato di fatto nella realtà regionale. Nell'ambito di queste iniziative è stata commissionata ad ARPAV una campagna di monitoraggio dei parametri microclimatici all'interno degli impianti natatori pubblici (piscine di tipo A/1 come definite dall'Accordo).

Riferimenti normativi

Con l'Accordo Stato Regioni citato sono stati fissati valori di riferimento anche per i parametri termoigrometrici e di ventilazione degli ambienti, sia per quanto riguarda gli ambienti vasche, sia per gli ambienti accessori quali spogliatoi, docce ecc..

I parametri considerati sono la temperatura dell'acqua di vasca, le temperatura e l'umidità relativa dell'aria, la velocità dell'aria, mentre non si fa riferimento ad indici sintetici di stress o di comfort termico quali quelli indicati dagli standard tecnici internazionali, recepiti anche a livello nazionale [2] [3] [4].

Per la temperatura dell'acqua di vasca viene indicato un intervallo di valori, differenziato fra vasche generiche e vasche orientate alla fruizione da parte dell'infanzia. Per l'umidità relativa dell'aria e la velocità dell'aria viene individuato un valore massimo da non superare, mentre per la temperatura dell'aria non vengono stabiliti valori di riferimento, ma si stabilisce la regola generale che la temperatura dell'aria non deve essere inferiore alla temperatura dell'acqua di vasca. Non si considerano la temperatura radiante né vi sono indicazioni in merito ai fattori di discomfort locale (asimmetria radiante, disomogeneità spaziale, transienti).

I requisiti numerici dell'Accordo Stato Regioni sono sintetizzati nella seguente tabella.

Tabella 1: Limiti Accordo Stato Regioni del 16 gennaio 2003

Parametro	Valore di riferimento
Temperatura acqua: vasca coperta in genere	24 – 30 °C
Temperatura acqua: vasca coperta bambini	26 – 32 °C
Temperatura aria: locale vasca	Non inferiore alla temperatura dell'acqua in vasca
Temperatura aria: altri locali	Non inferiore a 20 °C
Umidità relativa	Non superiore in nessun caso al 70 %
Velocità aria	Non superiore a 0,1 m/s nelle zone utilizzate dai frequentatori

INDAGINE SPERIMENTALE

Criteri di conduzione dell'indagine

La campagna di monitoraggio ha riguardato 24 tipici impianti natatori di pubblici, di caratteristiche simili in quanto a dimensioni delle vasche e degli ambienti, dislocati in varie zone del territorio della Regione. La dotazione più comune di questi impianti comprende una vasca principale, generalmente

lunga 25 metri, utilizzata per corsi di nuoto, allenamenti e nuoto libero, ed una vasca più piccola dedicata ad attività didattiche e gioco per i bambini, spesso inserita nel medesimo ambiente.

Per ciascun impianto l'indagine si è articolata in una ispezione dei locali e degli impianti (con particolare riferimento all'impianto di termoventilazione) con raccolta di informazioni di tipo tecnico e gestionale, e nella misura di diversi parametri chimico fisici caratterizzanti gli ambienti, fra i quali i parametri microclimatici previsti dall'Accordo Stato-Regioni. Tutte le campagne di misura sono state condotte in giornate di normale attività degli impianti natatori, in modo da monitorare la situazione ambientale nelle reali condizioni di fruizione. Le campagne di misura sono state svolte tutte in periodo primaverile o autunnale, in modo da rilevare le condizioni microclimatiche determinate dall'impiego degli impianti di termoventilazione escludendo l'apporto della ventilazione naturale, anche al fine di ottenere dati quanto più possibile confrontabili fra le diverse realtà; a tal fine si aveva cura di verificare che tutte le finestre fossero effettivamente chiuse nel corso delle misure.

Le campagne di misura

La campagna di misura ha avuto come oggetto per ciascun impianto natatorio una giornata feriale di normale attività, nella quale sono state eseguite misure puntuali e monitoraggi continuativi dei diversi parametri microclimatici ed in particolare: la temperatura dell'acqua di vasca è stata monitorata in modo continuativo per l'intera giornata in un primo gruppo di impianti, nel seguito è stata misurata solo per brevi intervalli (ciò in quanto si era riscontrata una generale notevole stabilità di questo parametro). Per la temperatura dell'aria è stato eseguito il monitoraggio per l'intera giornata all'interno dell'ambiente vasca di ciascun impianto, posizionando il sensore sempre in posizione quanto più possibile centrale, rappresentativa delle condizioni medie a bordo vasca, lontana da fonti di calore, da correnti d'aria e al riparo dall'irraggiamento solare diretto; è stata inoltre eseguita una serie di misure puntuali in tempi ravvicinati in una griglia di punti a bordo vasca, allo scopo di ottenere una rappresentazione della disomogeneità di questo parametro all'interno dell'ambiente. In un certo numero di impianti è stata anche monitorata, in contemporanea alla temperatura in ambiente vasca, la temperatura dell'aria lungo i percorsi di accesso/uscita dal suddetto ambiente (passaggio obbligato/corridoio/spogliatoio). L'umidità relativa dell'aria è stata monitorata per l'intera giornata nello stesso punto di monitoraggio della temperatura. Per quanto riguarda la velocità dell'aria, si sono eseguite misure puntuali, in una griglia regolare di punti a bordo vasca a 150 cm da piano di calpestio, in condizioni controllate (impianto di termoventilazione a regime e chiusura di tutte le aperture verso l'esterno, assenza di persone in movimento nell'ambiente).

Risultati dell'indagine

Tutti i dati raccolti sono stati inseriti in grafici comparativi delle prestazioni dei diversi impianti natatori e confrontati con i valori di riferimento stabiliti dalla normativa vigente.

In Figura 1 e 2 sono riportati i in modo sintetico i risultati relativi alla temperatura dell'acqua di vasca (le barre orizzontali rappresentano i limiti dell'intervallo di valori consentito).

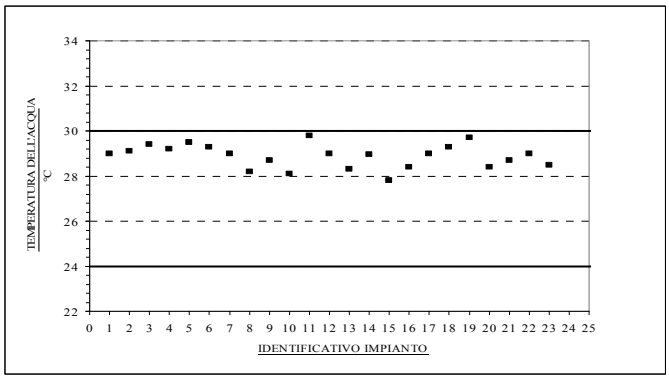


Figura 1: Risultati dei monitoraggi dell'acqua di vasca – vasca generica - grande

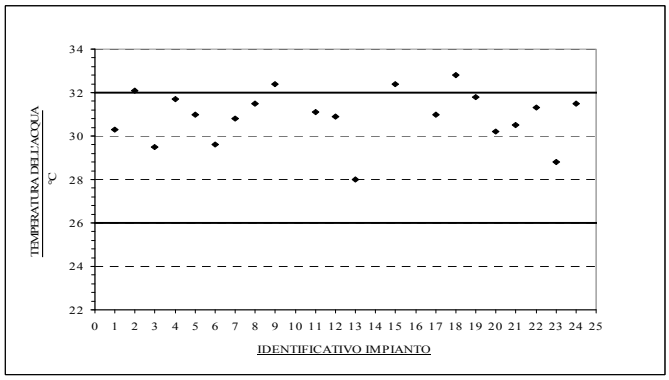


Figura 2: Risultati dei monitoraggi dell'acqua di vasca – vasca per bambini

Nella quasi totalità dei casi, i valori di riferimento per la temperatura dell'acqua sono rispettati. Si nota comunque come i valori si localizzano prevalentemente a ridosso del limite superiore dell'intervallo consentito.

In Figura 3 sono riportati i risultati relativi alla temperatura dell'aria a bordo vasca. Per ciascun impianto sono indicati il valore medio e l'escursione riferiti all'interno periodo di apertura al pubblico nella giornata di misura.

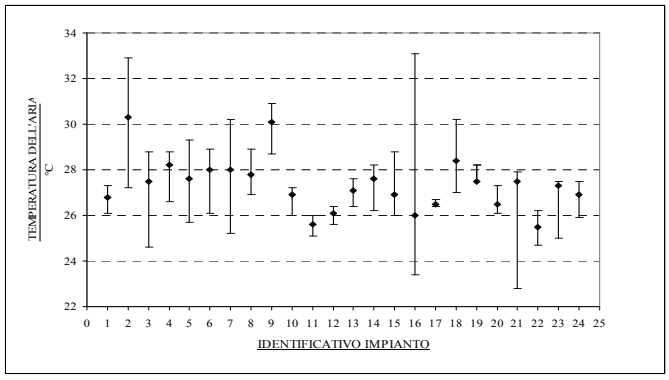


Figura 3: Temperatura dell'aria locale vasca.

In Figura 4 e 5, a scopo di confronto con i valori di riferimento dell'Accordo Stato Regioni, sono riportate le differenze medie fra temperatura dell'acqua e corrispondente temperatura dell'aria a bordo vasca, rispettivamente per vasca grande/generica e vasca piccola. In base alle prescrizioni normative la situazione è conforme alla norma per valori

positivi di questa differenza.; i valori riscontrati risultano, nella quasi totalità dei casi, non conformi.

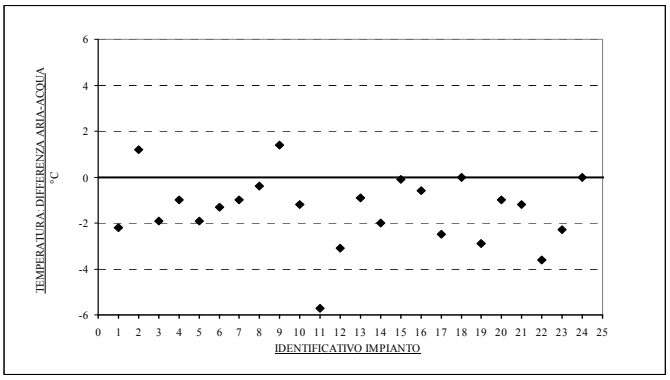


Figura 4: Differenze temperatura aria-temperatura acqua – vasca grande

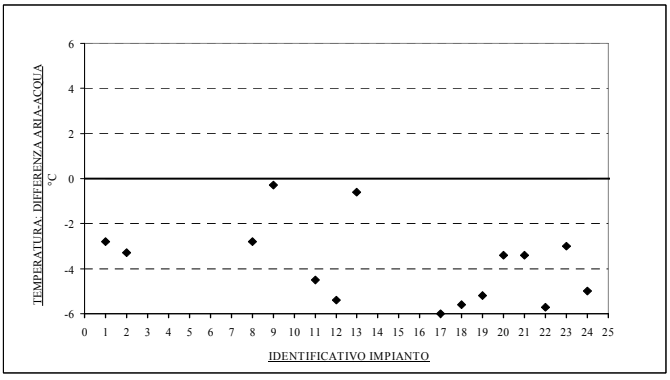


Figura 5: Differenze temperatura aria-temperatura acqua – vasca bambini.

Per quanto riguarda l'umidità relativa il valore medio e l'escursione per l'intera giornata di misura sono riportati in Figura 6.

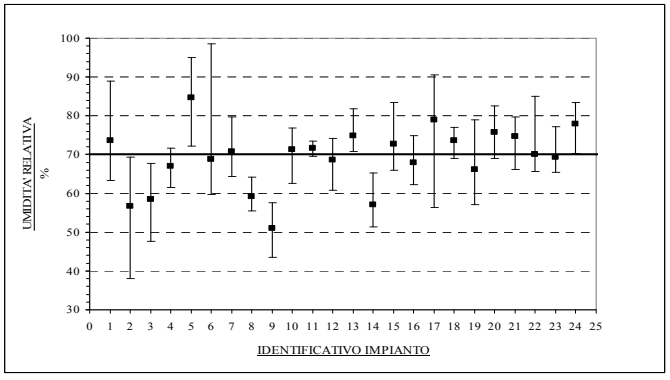


Figura 6: Umidità relativa in ambiente vasca..

Anche per questo parametro nella maggior parte dei casi il limite del 70 % è superato almeno per parte della giornata.

Infine si riportano nella Figura 7 i risultati relativi alla velocità dell'aria. Il dato riportato è la media spaziale dei valori puntuali rilevati in una griglia di punti a bordo vasca, nelle aree di in cui vi è presenza o transito di persone. Si evidenzia anche in questo caso il mancato rispetto del limite normativo in buona parte delle situazioni verificate.

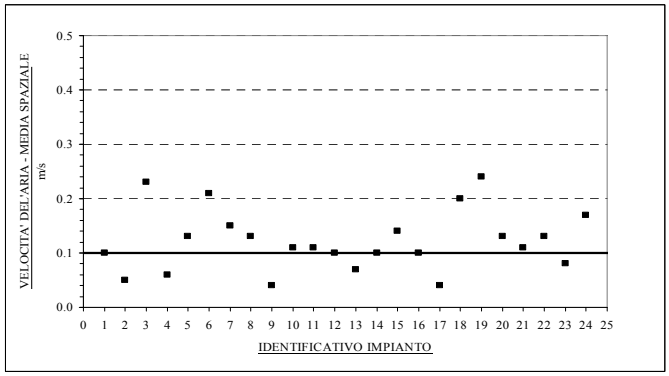


Figura 7: Velocità dell'aria..

ANALISI CRITICA DELLE PRESCRIZIONI NORMATIVE

I risultati dell'indagine sperimentale hanno evidenziato una diffusa difficoltà nell'adeguamento agli standard termoigrometrici fissati dall'Accordo Stato Regioni, in particolare per quanto riguarda l'aria ambiente in locale vasca.

Ciò considerato, ci si deve chiedere se questa situazione sia, in parte, conseguente ad una effettiva inadeguatezza delle prescrizioni normative in relazione alle esigenze che le stesse dovrebbero soddisfare.

Vi sono diverse ragioni per stabilire delle limitazioni e/o dei valori di riferimento per i parametri termoigrometrici nelle piscine; queste ragioni possono essere così schematizzate:

a) Garantire condizioni di equilibrio e comfort termico per gli utenti immersi in vasca ed impegnati in attività fisiche di diversa intensità, e prevenire perdite di calore eccessive ed un conseguente eccessivo abbassamento termico corporeo.
b) Garantire condizioni di sicurezza e di comfort termoigrometrico per i lavoratori che operano all'interno dei locali della piscina ed in particolare a bordo vasca (assistenti ai bagnanti, istruttori di nuoto e di altre attività ginnico-sportive, addetti alle pulizie e manutenzioni,)
c) Garantire condizioni di sicurezza e di comfort termoigrometrico per gli utenti fuori vasca nelle diverse fasi: preparazione in spogliatoio, doccia, trasferimento all'ambiente vasca, eventuali uscite temporanee dall'acqua durante lo svolgimento delle attività, uscita dalla vasca e trasferimento alla zona docce/spogliatoi a fine attività, eventuale utilizzo dei servizi igienici.
d) Limitare, per quanto possibile, i fenomeni di evaporazione dalla vasca sia del vapore acqueo che di altri gas e sostanze disciolte (segnatamente il cloro libero e le sostanze organoclorurate che ne derivano). Limitare l'evaporazione costituisce un obiettivo importante perché consente di controllare con minor dispendio energetico il tasso di umidità nell'aria ambiente che, se eccessivamente elevato, oltre a peggiorare le condizioni di comfort termoigrometrico percepito dal personale che opera a bordo vasca, può comportare problemi di condensa con conseguente precoce danneggiamento e corrosione delle strutture; inoltre limitare l'evaporazione di cloro e derivati contribuisce a migliorare la qualità dell'aria ambiente e a limitare la necessità di reintegro di queste sostanze.
e) Contribuire a controllare e prevenire i fenomeni di proliferazione di microrganismi, muffe e alghe la cui intensità e velocità dipende in modo sensibile dalla temperatura.

Analizzando i contenuti dell'Accordo Stato Regioni alla luce delle finalità così delineate, possiamo formulare alcune considerazioni.

Per quanto riguarda la temperatura dell'acqua di vasca ed il suo rapporto con la temperatura dell'aria, si consideri che la conducibilità termica dell'acqua è molto più elevata di quella dell'aria, pertanto la cessione di calore dal corpo umano all'ambiente è molto più rapida per una persona immersa in acqua che in aria; i meccanismi di vasocostrizione che l'organismo mette comunque in atto, e che rallentano il trasferimento di calore dal nucleo del corpo alla pelle non sono sufficienti a controbilanciare questa differenza: è stato valutato infatti che il reale rateo di scambio termico dal corpo umano all'ambiente circostante è, nella media, superiore di un fattore 3,3 nel caso di persona immersa in acqua rispetto a quanto avviene in aria [5]. Ciò comporta che il mantenimento di condizioni di equilibrio termico richiede temperature sensibilmente più elevate in acqua di quanto avviene in aria. La perdita di calore può essere compensata dalla produzione di calore metabolico legata all'attività natatoria, tuttavia è stato riscontrato che per temperature al di sotto dei 24 °C ciò non è sufficiente a mantenere l'equilibrio termico e la temperatura interna decresce rapidamente anche nel caso di attività fisica intensa [6] [7]. E' stato evidenziato [6] [8] che per una persona immobile in acqua la temperatura corporea interna tende a portarsi più o meno rapidamente alla temperatura dell'acqua, ad eccezione di un intervallo molto ristretto di valori (28-30 °C). Per temperature inferiori ai 28 °C nel caso di persona a riposo, si verifica un progressivo decremento della temperatura interna che comunque si può mantenere entro valori contenuti purché la durata dell'immersione sia limitata (ad esempio in [9] si riportano risultati di una prova sperimentale nella quale si evidenzia una diminuzione della temperatura esofagea inferiore a 2 °C per immersione di mezz'ora a 26,5 °C a riposo). Per i bambini vi è una maggior dispersione termica dovuta al maggior rapporto superficie/volume, pertanto a parità di altre condizioni, sono richieste temperature più elevate [9].

I valori fissati dall'Accordo Stato Regioni per la temperatura dell'acqua sono in linea con queste indicazioni; i limiti inferiori tuttavia (24 °C per vasca generica), considerato che una frazione significativa degli utenti svolge attività fisica moderata (nuoto non agonistico in condizioni di rilassamento, scuola di nuoto, giochi, attività di riabilitazione), appaiono eccessivamente bassi (ciò è indirettamente confermato dai risultati dell'indagine che evidenziano come le temperature siano mantenute generalmente prossime al limite superiore del range consentito).

Passando ad analizzare il problema del comfort termico fuori vasca, consideriamo innanzitutto la situazione relativa ai lavoratori. A tale scopo ben si adatta il criterio di valutazione basato sul Voto Medio Previsto (PMV), standardizzato dalla norma UNI EN ISO 7730 [2]. E' noto infatti che tale criterio è in grado di fornire valutazioni attendibili nel caso di ambienti termici moderati nei quali la regolazione dei parametri microclimatici è ottenuta mediante sistemi meccanici di termoventilazione, come nel caso che qui abbiamo considerato [10].

Applicando tale criterio al caso del personale che opera a bordo vasca, valutando in 0,25 clo la resistenza termica associata al tipico abbigliamento di questo personale e un impegno fisico moderato (1,2 met, valore indicato dalla UNI 7730 per attività di tipo sedentario), con velocità dell'aria prescritta inferiore a 0,1 m/s, la temperatura operativa corrispondente ad una sensazione termica neutra (PMV = 0) risulta compresa fra 26 e 27 °C. Gli elevati valori di umidità relativa che generalmente caratterizzano questi ambienti fanno sì che la sensazione di calore sia superiore a quella associata alle medesime temperature in ambienti di tipo civile (la UNI 7730 suggerisce che ogni incremento di 10% di umidità relativa corrisponde ad un incremento di 0,3 °C della sensazione termica, a parità di altre condizioni). Perciò va considerata una temperatura di comfort inferiore di 1-2 °C , pari a 24-26°C. Nel caso vi sia presenza di carico termico radiante (periodo primaverile in particolare) questi valori di temperatura operativa corrispondono a valori di temperatura dell'aria ulteriormente ridotti. Dalle considerazioni di cui sopra risulta evidente che il rispetto delle prescrizioni dell'Accordo Stato-Regioni per la temperatura dell'aria può non essere compatibile con il verificarsi di una situazione di comfort termoigrometrico per gli operatori. Ciò è tanto più vero se si considera che la maggior parte degli impianti comprende nello stesso ambiente vasche di tipo generale e vasche riservate ai bambini con temperatura dell'acqua che può arrivare a 32 °C. Si consideri inoltre che almeno per parte del tempo, il personale può essere impegnato in attività (es. pulizie, spostamento materiali) che richiedono un impegno fisico superiore a quello ipotizzato, di tipo sedentario.

L'analisi del comfort termico fuori vasca per gli utenti, costituisce un problema più complesso e non trattabile in modo semplice con i metodi della norma UNI 7730, che forniscono una stima attendibile della sensazione termica nel caso di condizioni termoigrometriche stazionarie o poco variabili; si tratta infatti di situazioni di tipo transitorio e rapidamente variabile con passaggio repentino da un ambiente acquatico ad un ambiente termico completamente diverso, nel quale la persona si trova pressoché svestita e completamente bagnata; l'utente si sposta poi attraverso ambienti diversi – passaggio obbligato – doccia – spogliatoio, con situazioni termoigrometriche che possono essere molto diverse (basti pensare che il limite minimo di temperatura per locali diversi dall'ambiente vasca è di 20 °C, ed in effetti nel corso dell'indagine sperimentale sono state riscontrate differenze anche di oltre 6 °C fra locale vasca e spogliatoio). Ciò che si può comunque affermare è che, rispetto al problema del comfort termico per gli operatori, la temperatura dell'aria corrispondente ad una situazione termica neutra per una persona che esce dalla vasca è sicuramente superiore a quella che si può determinare per gli operatori, in quanto vi è in questo caso una forte componente di scambio termico per evaporazione che sposta verso temperature più alte il punto di equilibrio termico; la quota di scambio termico per evaporazione aumenta all'aumentare della velocità dell'aria ed al diminuire dell'umidità relativa; sembra quindi che le prescrizioni su temperatura dell'aria, umidità relativa e velocità dell'aria siano più confacenti al comfort termico degli utenti che degli operatori. In ogni caso la prescrizione di mantenere la temperatura dell'aria allo stesso livello della temperatura dell'acqua non sembra trovare una immediata giustificazione nella letteratura scientifica, se l'obiettivo è il comfort termoigrometrico delle persone che escono dalla vasca (si consideri che vi è un notevole scarto fra le temperature in acqua e in aria che si possono considerare equivalenti dal punto di vista dell'equilibrio termico del corpo umano, come evidenziato in [5]).

Allo scopo di conciliare le esigenze contrastanti relative al comfort per i bagnanti e per gli operatori, si dovrebbero prendere in considerazione le seguenti possibilità:

1) valutare l'effettiva giustificazione della prescrizione sulla temperatura dell'aria ed eventualmente consentire

temperature dell'aria di qualche grado più basse rispetto a quella dell'acqua, o quanto meno vincolare la temperatura dell'aria alla temperatura delle sole vasche generiche non considerando nel confronto le vasche per bambini per le quali è necessario mantenere temperature dell'acqua più elevate.

2) considerare un abbassamento di uno o due gradi dei limiti massimi di temperatura dell'acqua (ciò potrebbe essere un compromesso accettabile tale da non compromettere in modo drammatico il comfort termico in acqua e la sicurezza)
3) considerare la possibilità di un incremento delle velocità dell'aria a bordo vasca, nelle zone occupate dagli operatori (ciò consentirebbe di ottenere condizioni di comfort a temperatura più alta, a parità di altre condizioni).
4) considerare un abbassamento del limite massimo per l'umidità relativa.

Le soluzioni prospettate puntano ed ottenere condizioni di maggior comfort termico per gli operatori mantenendo una situazione ottimale per gli utenti immersi in vasca, anche se potrebbero comportare un certo discomfort transitorio per le persone in fase di uscita dalle vasche.

Nel considerare le soluzioni sopra prospettate, si dovrebbe tener presente che un abbassamento delle temperature comporterebbe un beneficio dal punto di vista del risparmio energetico e del consumo di prodotti disinfettanti, mentre un incremento della ventilazione ed un abbassamento dell'umidità relativa comporterebbero un maggior dispendio energetico, ma garantirebbero altresì una miglior protezione contro il degrado delle strutture.

CONCLUSIONI

I risultati di un'indagine condotta su un consistente numero di impianti natatori pubblici della Regione Veneto ha messo in evidenza una diffusa difficoltà di adeguamento alle prescrizioni della normativa nazionale (Accordo Stato Regioni 16 gennaio 2003) per quanto riguarda i parametri termoigrometrici e di ventilazione. Un'analisi critica delle prescrizioni normative alla luce delle conoscenze scientifiche e tecniche ha evidenziato come tali difficoltà possano essere in parte dovute alla necessità di conciliare il perseguimento di obiettivi diversi, quali l'ottimizzazione delle condizioni di conduzione degli impianti, la tutela della salute e sicurezza dei lavoratori, il benessere termoigrometrico di diverse tipologie di utenti ed il risparmio energetico, mediante il controllo di determinati parametri fisici.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Conferenza Stato - Regioni seduta del 16 Gennaio 2003. Accordo tra il Ministro della salute, le Regioni e le Province Autonome di Trento e di Bolzano relativo agli aspetti igienico-sanitari per la costruzione, la manutenzione e la vigilanza delle piscine a uso natatorio. (G.U. n 51 del 3 marzo 2003).
2. UNI EN ISO 7730:2006 – Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.
3. EN ISO 7933:2004 - Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.
4. ASHRAE Standard 55, Thermal environment conditions for human occupancy.
5. R. Merrill Smith, J M. Hanna, Skinfolds and resting heat loss in cold air and water: temperature equivalence, Journal of Applied Physiology, 1975;39:93-102
6. F. Macaluso, D. Palumbo, R. Barone, G. Battaglia, F. Farina, V. De Felice, Effects of water temperature on swimmers, Capsula Eburnea, 3(8):1-5, 2008
7. L.G.C. Pugh, O.G. Edholm, The physiology of channel swimmers, The Lancet, 1955:269:761-768
8. A.B. Jr. Craig, M. Dvorak, Thermal regulation during water immersion, Journal of Applied Physiology 1966; 21:1577-1585
9. I. Holmér, U. Bergh, Thermal physiology of man in the aquatic environment, in K.Cena, J.A.Clark (ed.), Bioengineering, thermal physiology, and comfort, chap. 9, Wroclaw Technical University Press, 1981
10. R. de Dear, Thermal comfort in practice, Indoor Air 2004; 14 (Suppl 7):32-39

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DEL TEATRO DELLA FILARMONICA DI CORCIANO

Marco Vergoni[1], Michele Urbani[2], Mattia Faleri[3].

[1]CIRIAF Sez. Fisica Tecnica Inquinamento Ambientale, Università di Perugia, via Duranti 67, 06125 Perugia
[2]Università di Perugia, via Duranti 67, 06125 Perugia
[3]Centro di Ricerca sulle Biomasse, str. Santa Lucia Canetola s.n., 06125 Perugia.

SOMMARIO

Il CIRIAF è stato incaricato dal Comune di Corciano di effettuare la caratterizzazione acustica del Teatro della Filarmonica limitatamente alla valutazione della qualità acustica della sala.

L'edificio ha subito un profondo rifacimento strutturale e di volumetrie rispetto alla sua conformazione originale: il contributo del CIRIAF è stato pertanto richiesto in fase di cantiere avanzata, per poter orientare l'Amministrazione Comunale e i progettisti verso le scelte più idonee in grado di garantire condizioni di ascolto ottimali.

La prima fase di rilievo in situ, con l'acquisizione dei più comuni descrittori acustici, è stata condotta in condizioni di lavoro non ottimali: infatti, al momento del rilievo, erano presenti le strutture delle impalcature metalliche. Grazie ad un codice di calcolo commerciale è stato ricreato il modello della sala, ponendo particolare attenzione a riprodurre l'esatta configurazione riscontrata durante le misure.

Successivamente, sono state sviluppate delle ipotesi progettuali della sala, valutando con particolare attenzione la presenza di un rivestimento in cartongesso sul soffitto, posto a disegnare una volta a botte. Sono state suggerite soluzioni per le finiture interne e per gli arredi, con l'intento di ottimizzare le condizioni di ascolto nel rispetto dell'idea progettuale originaria.

INTRODUZIONE

Il Comune di Corciano (PG) ha incaricato il CIRIAF di effettuare la caratterizzazione acustica del Teatro della Filarmonica.

L'edificio del Teatro è limitrofo alle mura dell'antico borgo di Corciano, vicino alla chiesa ed al convento di San Francesco di cui anticamente faceva parte. La costruzione, a pianta rettangolare, fu realizzata con pietra locale; una prima profonda modifica al suo assetto originario avvenne negli anni '50, con l'aggiunta di un corpo seminterrato sul lato destro, al fine di dotare la sala di tutti i servizi necessari. Altri interventi hanno trasformato alcuni spazi, per rendere più funzionale l'edificio, creando ad esempio la biglietteria e un soppalco all'interno della sala principale.

Nel corso degli anni la sala è stata impiegata per rappresentazioni teatrali e musicali; le normative in materia di locali adibiti a pubblico spettacolo ne hanno reso necessario un deciso e radicale adeguamento ed è in tale ottica che l'Amministrazione Comunale ha voluto valutarne anche gli aspetti acustici. Nello specifico, lo studio condotto dal CIRIAF ha riguardato la corretta trasmissione del messaggio sonoro nella zona destinata al pubblico con l'acquisizione dei più comuni descrittori acustici in condizioni di lavoro non ottimali vista la presenza di impalcature metalliche. Successivamente, è stata eseguita una modellazione acustica della sala con l'ausilio di un codice di calcolo: sono state sviluppate delle ipotesi progettuali valutando le prestazioni acustiche dell'ambiente in funzione di finiture e complementi d'arredo.

DESCRIZIONE DEL TEATRO

La sala oggetto di indagine si sviluppa su pianta rettangolare con una capienza di 148 posti a sedere ed al momento delle misure costituita solamente dalle strutture portanti e dalle tamponature.

Così come risulta dallo stato di progetto, l'ambiente sarà composto dalla zona Platea, di circa 130 m^2, raggiungibile dall'ingresso del piano terra mediante due rampe di scale ed un ascensore. Nello stesso volume è prevista la realizzazione del palcoscenico (circa 88 m^2), ad una quota rialzata rispetto alla platea. Il palcoscenico risulta poi collegato al livello sottopalco mediante una scala a chiocciola ed un ascensore, dove saranno presenti anche i camerini e i servizi per il pubblico. Sempre nella sala principale, l'altezza al colmo della volta a botte prevista sarà mediamente di circa 7 metri; verrà inoltre realizzato un soppalco con struttura in ferro e tavolato in legno, destinato alla regia, che risulterà accessibile mediante una scala interna. La parte soprastante il palcoscenico sarà dotata di un graticcio in legno e ferro per la manovra di scenografie e macchine teatrali.

Altri elementi notevoli per la caratterizzazione acustica della sala, così come indicato sullo stato di progetto, sono il pavimento della platea in legno, la posa in opera di nuovi infissi in legno verniciato, la presenza di intonaco liscio sulle facce interne delle pareti, il controsoffitto in cartongesso a formare la volta a botte, alcune colonne decorate con stucchi e gesso, tende e tappezzerie in velluto.

SISTEMA DI MISURA

Il sistema di acquisizione è costituito dal Symphonie della 01dB-Stell. Esso comprende una PC-Card che lo collega ad un PC, su cui è installato il programma dBBATI32 che consente di elaborare i segnali acustici acquisiti.

Il sistema è costituito da una capsula microfonica Random Incidence da 1/2 pollice (40 AR) della G.R.A.S. (Sound &

Vibration) e un Preamplificatore da ½ pollice del tipo a condensatore (PRE12H), con scala di frequenza 1÷20 kHz. E' stata impiegata una sorgente dodecaedrica omnidirezionale modello DL-301 LOOKLINE, dotata internamente di amplificatore e generatore di rumore. Essa è costituita da 12 altoparlanti con magneti al neodimio; la potenza sonora massima è maggiore di 122 dB ref. 1pW, ed è rispondente alle specifiche degli standard internazionali ISO 140 e ISO 3382. Ha una risposta in frequenza estesa da 40 a 20.000 Hz, un diametro di 385 mm e un peso di 9,5 kg; la sorgente è posizionata su un supporto ad altezza regolabile.

METODOLOGIA DI MISURA DEI DESCRITTORI ACUSTICI

La prima fase di misura è rappresentativa della situazione di cantiere in fase avanzata; sono stati misurati i parametri acustici fondamentali per ottenere i dati di input necessari allo sviluppo delle simulazioni.

Occorre sottolineare come tale sessione di misure sia stata caratterizzata da numerose difficoltà di carattere pratico: in particolare, la presenza del palco a servizio degli operai, che risultava completamente allestito all'interno della sala e del palcoscenico, ha influenzato significativamente la risposta acustica della sala (fig.1a). Inoltre, le numerose superfici metalliche e l'ingombro della stessa impalcatura hanno condotto a scelte inevitabilmente forzate nella dislocazione dei punti di misura (18 posizioni di misura complessive), che in ogni caso risultano coprire in modo uniforme lo spazio dedicato alla platea.

È stata riscontrata la necessità di chiudere in maniera provvisoria le aperture destinate all'alloggiamento delle porte che si affacciano sulla sala; con opere di carpenteria leggera, la sala è stata resa idonea per effettuare le misure. Per potere eseguire correttamente l'acquisizione dei descrittori acustici, è necessaria la valutazione del T_{60} dell'ambiente e del rumore residuo, al fine di garantire a sorgente accesa un livello di pressione sonora superiore di almeno 45 dB rispetto al rumore residuo.

Una volta determinato il T_{60} medio, è stato impostato il software di acquisizione dBBATI: per ciascuna posizione di misura l'emissione del segnale e la contemporanea acquisizione hanno avuto la durata di 1 minuto e 22 secondi.

Le misure sono state effettuate con la sorgente dodecaedrica posta ad un'altezza di 1.7 m, posizionata al centro del palcoscenico (fig. 1b).

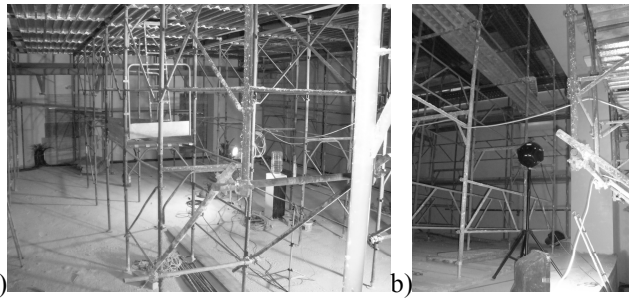


Figura 1: a) Impalcatura metallica presente al momento delle misure. b) Posizione della sorgente dodecaedrica al centro del palcoscenico.

In accordo con quanto previsto dalla normativa UNI EN ISO 3382, il ricevitore deve essere posizionato ad una quota di 1.2 m da terra e distante almeno un metro da superfici riflettenti e in generale dalle pareti.

L'acquisizione dei descrittori acustici veri e propri è stata ottenuta con il metodo della risposta all'impulso, con la generazione di un segnale pseudocasuale MLS. La misura dei parametri è stata ripetuta per ogni posizione in bande di ottava.

RISULTATI E ANALISI DELLE MISURE IN FASE DI CANTIERE

Tempo di riverberazione

Per il tempo di riverberazione si sono determinati gli intervalli ottimali al variare della frequenza, partendo dalla destinazione d'uso e dal volume della sala. Nello specifico, è stata individuata come destinazione d'uso prevalente quella di sala da concerto per musica leggera, che porta in sé il contributo sia della musica che del parlato.

In figura 2 è mostrato l'andamento del tempo di riverberazione della sala in fase di cantiere: sono visibili le linee rappresentative del T_{60} misurato in funzione della frequenza e l'intervallo di variabilità dei valori ottimali desunto dalla Letteratura [1], [2].

Lo stato acustico risulta piuttosto singolare, con il solo valore a 3150 kHz che ricade nell'intervallo ottimale. Nel dettaglio, si osservano scostamenti di circa 1 secondo per le basse frequenze, maggiori del valore limite superiore individuato dalla linea tratteggiata in figura; nelle frequenze centrali si assiste ad una inversione del comportamento rispetto al range ottimale, con i valori che continuano a decrescere in modo costante fino alle alte frequenze, in cui si nota che lo scostamento resta comunque contenuto, dell'ordine di 0,5 secondi a 8 kHz, ma al di sotto del valore limite inferiore dei valori ottimali individuato dalla linea tratto-punto.

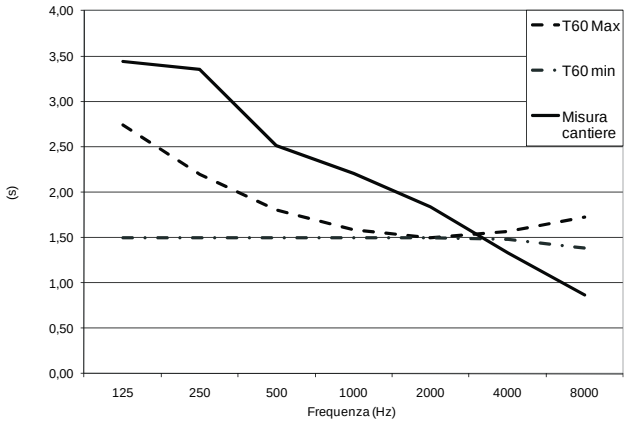


Figura 2: T_{60} medio misurato e intervalli di variabilità ottimali.

Indici di chiarezza e definizione

Le misure degli indici di Chiarezza e Definizione (vedi fig. 3 e 4) evidenziano una situazione che pare essere già soddisfacente dal punto di vista della corretta trasmissione del segnale sonoro, in particolare per l'ascolto di musica.

Si nota come per l'indice di Chiarezza la situazione non rientri nei valori ottimali soltanto per le alte frequenze, 4000 e 8000 Hz. I risultati per l'indice di Definizione mostrano un andamento analogo, e resta fuori dal range ottimale il solo valore misurato a 8000 Hz.

In tabella 1 sono riportati i valori medi degli indici di trasmissione del parlato STI e RaSTI misurati in fase 1.

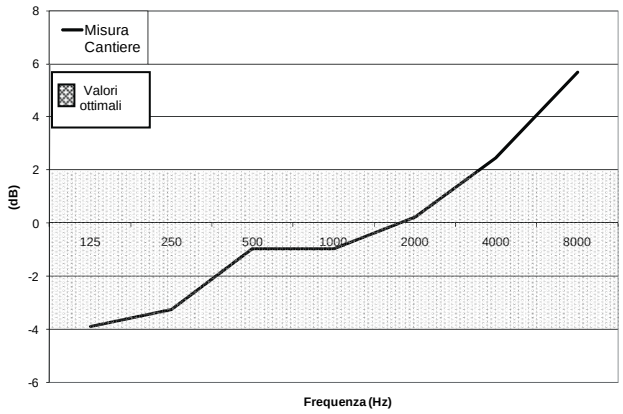


Figura 3: Indice di C_{80}, valore medio misurato e valori ottimali.

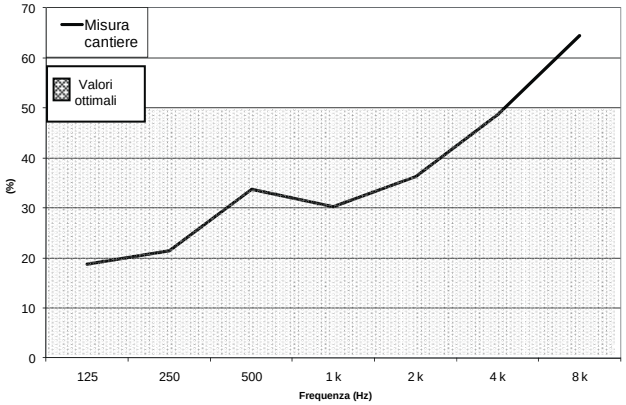


Figura 4: Indice D, valore medio misurato e valori ottimali.

Tabella 1: Indici STI e RaSTI - Valori medi misurati in fase 1.

Media misurata STI	**Classe Intelligibilità**
0.49	Discreta
Media misurata RaSTI	**Classe Intelligibilità**
0.49	Discreta

Tabella 2: Classi di qualità della comunicazione.

Valore indice STI	**Classe di qualità della comunicazione**
< 0,30	Pessima
0,30 ÷ 0,45	Scadente
0,45 ÷ 0,60	Discreta
0,60 ÷ 0,75	Buona
> 0,75	Eccellente
Valore indice RaSTI	**Classe di qualità della comunicazione**
< 0,32	Cattiva
0,32 ÷ 0,45	Mediocre
0,45 ÷ 0,60	Discreta
0,60 ÷ 0,75	Buona
> 0,75	Eccellente

Confrontando i valori misurati con le classi di qualità dell'intelligibilità del parlato reperibili in Letteratura (tab. 2), si osserva come la classe di qualità del parlato risulti già discreta sia per l'indice STI che per l'indice RaSTI.

MODELLO PREVISIONALE

Il supporto decisionale nella scelta di materiali e complementi di arredo è stato fornito da un modello previsionale di simulazione dei principali descrittori acustici.

Il codice di calcolo impiegato è RAMSETE, il cui modello di simulazione e previsione del campo acustico si avvale dell'approssimazione dell'acustica geometrica e di un algoritmo di tracciamento di fasci divergenti piramidali.

Dal punto di vista operativo, si è proceduto con il rilievo architettonico della sala e il rilievo acustico dei principali descrittori (T_{60}, C_{80}, D_{50}, STI).

Successivamente, è stata modellata la sala, stimando i coefficienti di assorbimento delle superfici ed inserendo una sorgente omnidirezionale e dei ricevitori, in modo da ricreare le stesse condizioni di misura. Il modello è stato tarato al fine di ottenere la convergenza dei valori previsti dal software verso quelli misurati, variando i coefficienti di assorbimento acustico dei materiali e due parametri del modello che tengono conto della geometria della sala. Tale modello è stato poi modificato in base alle soluzioni progettuali ed è stata effettuata una simulazione finale per la valutazione dei benefici apportati alla qualità acustica della sala. Nel modello sono stati inseriti, oltre ai microfoni e alla sorgente virtuale omnidirezionale, nelle stesse posizioni occupate durante le misure, anche le superfici metalliche e gli ingombri presenti all'interno della sala (fig. 5).

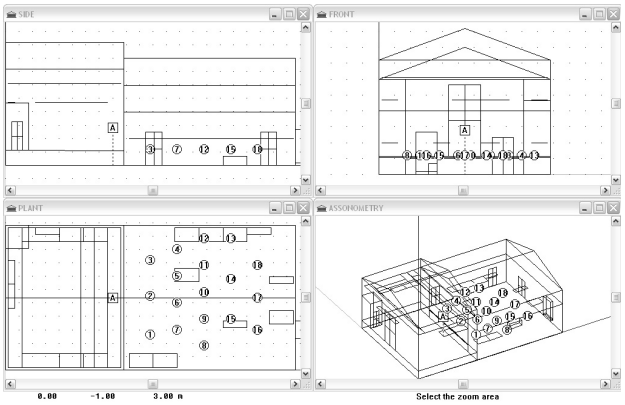


Figura 5: Modello del Teatro della Filarmonica di Corciano in fase di cantiere ricreato con Ramsete CAD.

È stata creata la sorgente virtuale, inserendo per ogni banda di frequenza il valore misurato in opera e ricreando una sorgente con caratteristiche di emissione identiche.

Successivamente, il modello è stato tarato al fine di ottenere la convergenza dei valori previsti da RAMSETE per i parametri T_{60}, C_{80} e D_{50} verso quelli misurati.

Nelle figure 6, 7 e 8 sono mostrati gli intervalli ottimali e i valori dei descrittori acustici misurati e ottenuti con i dati di output della simulazione.

Si osserva la coincidenza dei valori di output del software (Calibrazione) con i dati ottenuti dalle misure in cantiere per il T_{60}. Dopo la calibrazione il modello ha fornito, in tutti i casi, dati attendibili e molto prossimi a quelli misurati.

La tabella 3 riporta i valori di output della simulazione per gli indici STI e RaSTI, a confronto con i valori misurati.

Dai risultati emerge che il modello sovrastima sia lo STI che il RASTI, con una conseguente modifica della Classe di Intelligibilità.

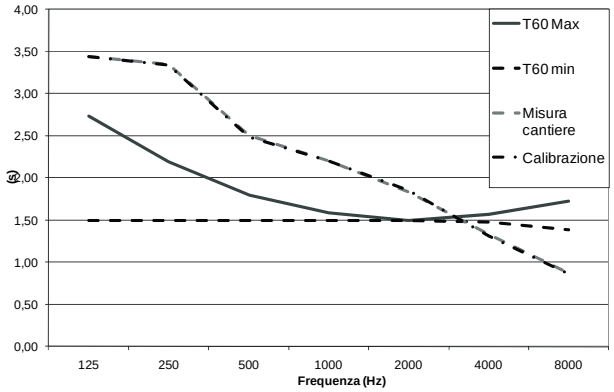


Figura 6: Confronto tra i risultati del modello e quelli delle misure per il T_{60}.

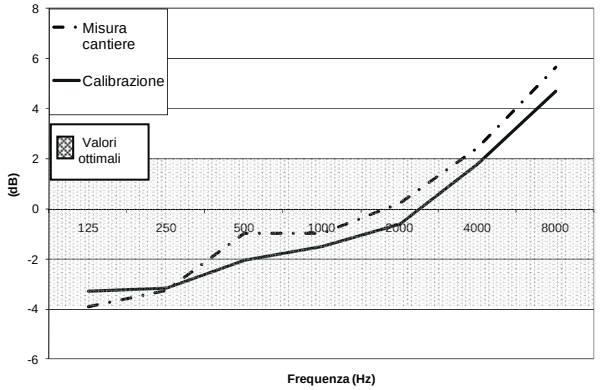


Figura 7: Confronto tra i risultati del modello e quelli delle misure per l'indice C_{80}.

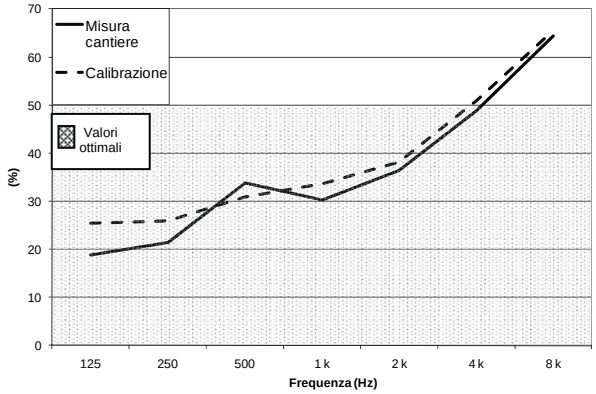


Figura 8: Confronto tra i risultati del modello e quelli delle misure per l'indice D.

Tabella 3: Indici STI e RaSTI - Valori medi misurati in fase 1

STI misurato	0,49
Classe	Discreta
STI simulato	0,62
Classe	Buona
RASTI misurato	0,46
Classe	Discreta
RASTI simulato	0,62
Classe	Discreta

SIMULAZIONI DELLO STATO DI PROGETTO

In questa sezione sono presentati i risultati ottenuti tramite codice di calcolo per la valutazione previsionale dello stato acustico finale del Teatro della Filarmonica di Corciano.

In particolare, sono state studiate le proprietà acustiche dei materiali individuati dal committente e dalla Direzione Lavori, con lo scopo di determinare i valori dei parametri acustici della sala a valle della loro posa in opera. Sono state simulate diverse configurazioni, agendo su alcuni complementi di arredo quali tendaggi, sipari, arlecchini e fondale.

La scelta dei materiali, basata essenzialmente sulle indicazioni del committente, è un aspetto basilare delle buone prestazioni acustiche della sala: la difficoltà maggiore risiede nel coniugare le caratteristiche tecniche delle finiture e gli aspetti estetici.

Le simulazioni sono incentrate principalmente sull'inserimento graduale delle finiture in ambiente RAMSETE CAD: la successiva caratterizzazione acustica dei materiali riveste un ruolo essenziale nella stima progettuale, adottando ove noti i valori del coefficiente di assorbimento fornito dalle aziende produttrici e stimando tale valore per gli altri materiali.

In figura 9 è riportato il modello completo ricreato con il modulo CAD del software secondo lo stato di progetto.

In tabella 4 sono riportati i materiali, l'estensione superficiale degli stessi.

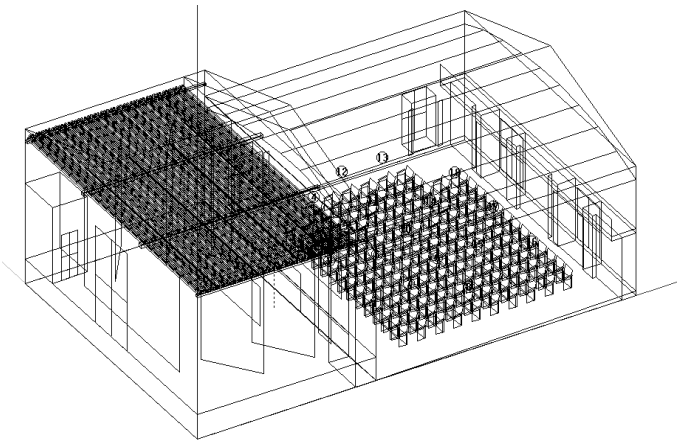


Figura 9: Stato di progetto - Modello del Teatro della Filarmonica di Corciano ricreato con Ramsete CAD.

Tabella 4: Materiali e relative superfici impegnate all'interno della sala nello stato di progetto

Materiali	**Superficie (m^2)**
Legno di pino (C)	174.5
Legno verniciato	71.5
Intonaco liscio	947.5
Pavimento legno duro	248.4
Tende velluto a 20 cm	11.2
Tende velluto tese	75.0
Tappezzeria stoffa	27.0
Ferro	165.9
Lamiera grecata	147.4
Cartongesso	168.9
Poltrone occupate	151.8

Nella Soluzione 1, i cui materiali in dettaglio sono schematizzati in tabella 5, è diminuito l'impiego del Legno di Pino e aumentata la superficie di Intonaco liscio; questo perché in tale soluzione è stato previsto che la balaustra del soppalco dedicato alla cabina di regia sia realizzata con un

materiale il più possibile riflettente. Un ulteriore accorgimento progettuale è stato l'eliminazione delle tende di velluto pesanti a copertura delle uscite di emergenza laterali e delle porte di accesso alla sala, sempre con l'intento di ridurre le unità assorbenti.

Tabella 5: Materiali e relative superfici impegnate all'interno della sala secondo la Soluzione 1

Materiali	**Superficie (m^2)**
Legno di pino (C)	165.9
Legno verniciato	71.5
Intonaco liscio	956.1
Pavimento legno duro	248.4
Tende velluto a 20 cm	11.2
Tende velluto tese	75.0
Tappezzeria stoffa	27.0
Ferro	165.9
Lamiera grecata	147.4
Cartongesso	168.9
Poltrone occupate	151.8

Gli accorgimenti previsti con la Soluzione 1 hanno avuto lo scopo di aumentare i valori del T_{60} per farlo rientrare nel range ottimale previsto per il Teatro. Tale scelta è stata dettata al termine di numerose iterazioni delle simulazioni, ipotizzando interventi da eseguire alle spalle della sorgente, ossia agendo sui materiali presenti nel palcoscenico: tali tentativi non hanno però condotto a risultati significativi. Infatti, soltanto una drastica diminuzione dei sipari, dei tendaggi e delle scenografie avrebbe condotto ad un risultato apprezzabile, ma tale idea progettuale risulta evidentemente non percorribile da un punto di vista della fruibilità della sala. Per questo motivo, si è scelto di diminuire le unità assorbenti nella sala, senza pregiudicarne l'estetica e la funzionalità.

Queste differenze sono evidenti da un punto di vista della qualità acustica della sala se tradotte in termini grafici con i valori delle grandezze acustiche.

In figura 10 sono riportati gli andamenti del T_{60} per le simulazioni del modello progettuale definitivo e della Soluzione 1, mettendole a confronto con i valori ottimali e con quelli misurati in fase di cantiere.

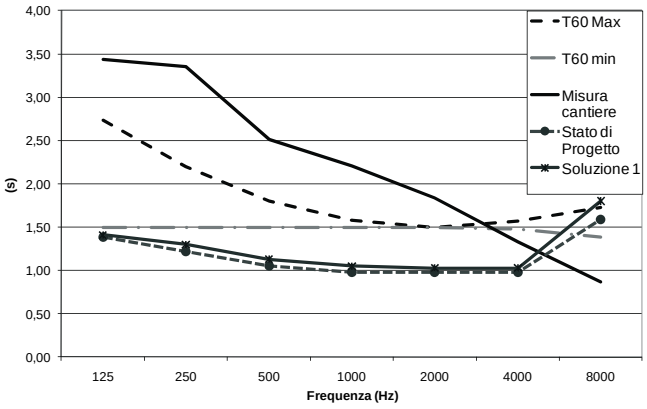


Figura 10: T_{60} – stato di progetto e soluzione proposta a confronto con i valori ottimali e misurati.

Si nota come il miglioramento sia considerevole nel passaggio dallo stato di cantiere a quello di progetto, come del resto era lecito attendersi, con il T_{60} che si avvicina decisamente al range ottimale: è evidente pertanto che l'azione dei complementi di arredo nei riguardi dell'onda sonora contribuisce ad un andamento dei valori di output decisamente più adeguato per le finalità alle quali è dedicata la sala.

Le differenze tra lo Stato di Progetto e la Soluzione 1 sono contenute, ma al contempo indici di un effettivo miglioramento ottenibile nel T_{60} semplicemente adottando gli accorgimenti previsti.

Anche per ciò che riguarda l'Indice di Chiarezza, in figura 11 sono riportati gli andamenti ottenuti dalle simulazioni.

Considerazioni analoghe a quanto riportato per il T_{60} valgono anche per tale parametro: nel dettaglio, si osserva una migliore stabilità dei valori, che si discostano al massimo di 1 dB dal range dei valori ottimali per l'ascolto di musica.

La Soluzione 1, anche in questo caso, contribuisce ad un avvicinamento dei valori all'intervallo ottimale.

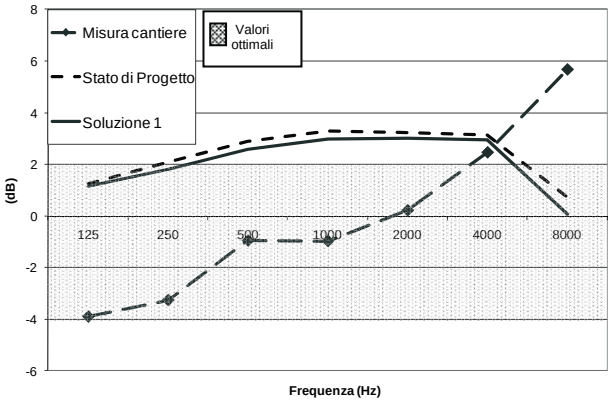


Figura 11: Indice C_{80} – stato di progetto e soluzione proposta a confronto con i valori ottimali e misurati.

Le simulazioni effettuate per l'Indice di Definizione si mantengono sulla stessa linea delle valutazioni effettuate per i precedenti parametri: si osserva in figura 12 come i valori si mantengano al di sotto del 60% per le frequenze centrali, mentre ricadono nell'intervallo ottimale per l'ascolto di musica alle basse frequenze e a 8kHz.

Infine nelle tabelle 6 e 7 sono riportati rispettivamente i valori per gli indici STI e RaSTI per lo stato di progetto e la soluzione 1.

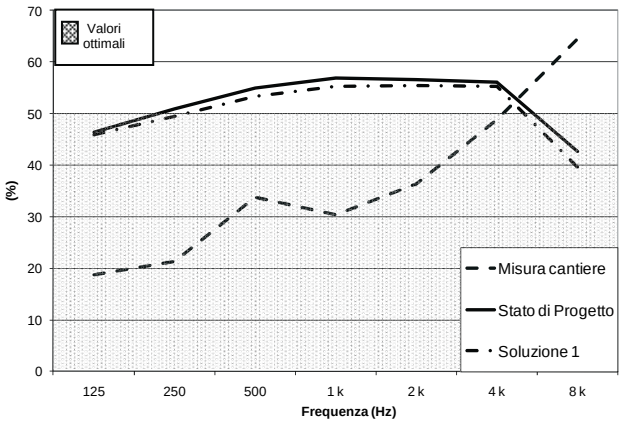


Figura 12: Indice di Definizione D – stato di progetto e soluzione proposta a confronto con i valori ottimali e misurati.

Tabella 6: Indici STI – Risultati delle diverse simulazioni a confronto con i valori misurati

Misurato	0,49
Classe	Discreta
Stato di progetto	0,75
Classe	Discreta/Buona
Soluzione 1	0,74
Classe	Buona

Tabella 7: Indici RaSTI - Risultati delle diverse simulazioni a confronto con i valori misurati

Misurato	0,49
Classe	Discreta
Stato di progetto	0,73
Classe	Buona
Soluzione 1	0,72
Classe	Buona

Gli effetti della Soluzione 1 si traducono anche in questo caso in una diminuzione dei valori dei due indici tipici dell'intelligibilità.

Tale risultato si può interpretare come una migliore risposta della sala a quello che è l'ascolto di musica e in una lieve flessione delle condizioni di comfort per la comprensione delle parole.

In conclusione, si può affermare che già nella configurazione dello Stato di Progetto, la situazione acustica della sala risulta idonea per lo svolgimento delle attività previste dalla destinazione d'uso e in particolare l'ascolto di musica.

I valori degli indici di qualità acustica delle sale risultano leggermente al di fuori degli intervalli ottimali, ma nell'esperienza maturata nell'impiego di tale software previsionale in altri ambiti è ragionevole ipotizzare una leggera sovrastima dei valori di output: tale considerazione dovrebbe consentire di ottenere in fase di collaudo una qualità acustica del Teatro della Filarmonica di Corciano in linea con i valori previsti dalla Letteratura.

ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

L'acustica del Teatro della Filarmonica di Corciano è stata attentamente studiata e valutata nel corso della ristrutturazione della sala, soprattutto nella fase di scelta delle finiture interne e di allestimento dei complementi di arredo, al fine di rendere ottimali le condizioni di ascolto in tutti i punti durante lo svolgimento di manifestazioni musicali o rappresentazioni teatrali alle quali l'edificio è destinato.

Scegliendo opportunamente i materiali per le finiture e per gli arredi, è possibile ottenere il valore del T_{60} ottimale in funzione della destinazione d'uso e del volume, controllando anche altri descrittori acustici come l'indice C_{80}, l'indice D, lo STI e il RaSTI.

Dai dati disponibili nella Letteratura specializzata, il T_{60} ottimale per la sala del Teatro della Filarmonica di Corciano, destinato all'ascolto di musica leggera e con un volume complessivo di circa 1500 m^3, è pari a 1.8 secondi alla frequenza di 500 Hz.

La campagna di misure e le simulazioni effettuate hanno fornito i seguenti risultati:

- assenza di finiture, fase di cantiere: T_{60}(500 Hz) = 2.51 s;
- simulazione dello stato di progetto: T_{60}(500 Hz) = 0.98 s;
- simulazione Soluzione 1: T_{60}(500 Hz) = 1.05 s.

Si osserva come in fase di cantiere il T_{60} sia sensibilmente più elevato rispetto al valore ottimale, come del resto era lecito aspettarsi a causa dell'arretrato stato di avanzamento dei lavori e per effetto dell'assenza delle finiture interne e dei complementi di arredo.

Analogo comportamento si è osservato per i valori degli indici di Chiarezza e Definizione: sebbene i valori di output delle simulazioni siano non perfettamente in linea con l'andamento ottimale, gli scarti risultano estremamente contenuti e dunque i risultati possono considerarsi idonei per lo svolgimento delle attività considerate al termine dei lavori di completamento.

Altri importanti descrittori dell'intelligibilità del parlato, come lo STI e il RaSTI, mostrano andamenti più che soddisfacenti, a testimonianza di un comportamento della sala e della scelta di finiture compatibili anche con la comprensione del messaggio parlato.

Le eventuali modifiche proposte con la Soluzione 1 possono condurre ad un ulteriore avvicinamento a quelli che sono i valori ottimali delle grandezze acustiche misurate.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. M.Felli: Lezioni di Fisica Tecnica 2 – Nuova edizione a cura di C.Buratti – Morlacchi Editore, 2004.
2. G. Moncada Lo Giudice, S. Santoboni: Acustica, Masson, 1997.
3. H.Haas: Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Späche
4. International Standard IEC 60268-16: Objective rating of speech intelligibility by Speech Transmission Index, 1998.
5. R.Spagnolo: Manuale di Acustica, UTET, 2001.
6. A.Farina: L'acustica dei piccoli ambienti di ascolto – Atti del seminario AES 2001.
7. UNI EN ISO 3382 – Acustica – Misurazione del tempo di riverberazione di ambienti con riferimento ad altri parametri acustici.
8. U.Nicolao, Manuale di Acustica Applicata per la Diffusione Sonora, Ed. Il Rostro, Milano, 2003.
9. AA. VV. La Diffusione Sonora in Ambienti Acusticamente Difficili, Quaderni di aggiornamento in tecniche e tecnologie audio, Ed. Il Rostro, 2002.
10. E.Meyer, E.C.Richardson: Technical aspects of sound, vol. III, Elsevier publ., Amsterdam, 1962.
11. L.Cremer, H.A.Muller, T.J.Schultz: Principles and applications of room acoustics. New York, Applied Science Publishers, 1982.
12. L.L.Beranek: Acoustics, New York McGraw Hill, 1954.
13. H.Kuttruff: Room Acoustics, 4th edition (2000), E&FN SPON, London.
14. M.Vorländer et al.: Practical aspects of MLS measurements in building acoustics Applied Acoustics 52 1997.

SCREENING DIAGNOSTICO DI BASE PER LA COMPATIBILITA' AMBIENTALE NEI BENI ARCHITETTONICI MUSEALI

Giuseppe Cannistraro[1] , Livio De Santoli[2], Antonella Romagnolo[3]

[1-3] Dipartimento Ingegneria Civile, D.I.C. – Contrada di Dio S. Agata – Messina
[2] Dipartimento di Fisica Tecnica – Università La Sapienza – Roma

SOMMARIO

Questo studio sulle tematiche della compatibilità ambientale e sull' "analisi del rischio" negli ambienti museali si avvia all'interno della collaborazione tra Centro Restauro della Regione Siciliana e Dipartimento di Ingegneria Civile di Messina.

Gli Enti Museali, secondo le norme vigenti, sono tenuti ad effettuare l'*analisi dei rischi*, per attivare strategie di sicurezza e di controllo delle azioni, che l'ecosistema può provocare sull'edificio (contenitore), sulle collezioni (contenuto artistico) e sui fruitori (contenuto antropico).

Le norme, inoltre, forniscono i criteri scientifici per valutare gli standard minimi di qualità per la cura e la gestione dei musei e auspicano la messa a punto di un modello-scheda capace di recepire e gestire informazioni di base sullo stato di conservazione dei manufatti, nonché sul controllo periodico delle loro condizioni ambientali.

Da qui, nasce l'esigenza di formalizzare uno strumento operativo di facile gestione per gli operatori, una "metodologia di monitoraggio sperimentale" applicabile, attraverso una modulistica per schede, a qualsiasi organismo architettonico destinato a museo o sala espositiva, utile per i gestori dei musei.

PREMESSA

Per *Museo* si definisce un istituto basato su un "edificio ospitante cose da conservare e preservare", un *contenitore d'arte* a scala architettonica, denominato dalla norma "museo-ufficio". [1]

In Italia, la maggior parte di palazzi antichi, di ville, di residenze nobiliari e storiche è stata adibita a Istituti d'Antichità e d'Arte, Musei, Gallerie espositive, Archivi storici, Biblioteche, Fondazioni. Si tratta di edifici, che rappresentano la nostra memoria storica e hanno valore in sé, al di là delle opere che contengono.

La loro diffusione sul nostro territorio è tale da farci identificare in un "unico manufatto artistico da conservare": l'opera da esporre e l'ambiente espositivo, esso stesso opera d'arte. Ciò mantiene ancora salda la questione prettamente italiana sulla conservazione e tutela dei beni artistici *mobili* e *immobili*.

QUADRO NORMATIVO

Analisi del rischio

Conservare e preservare un bene artistico richiede attenzioni particolari. Va attivato un doppio sistema di azioni, che prevede attività di *restauro* e di *prevenzione* a contrasto di tutti quegli agenti, che concorrono e accelerano il *degrado* e mettono il bene a *rischio di perdita*. In tale ambito, si è delineata la questione sull'"analisi del rischio".

L'analisi dei rischi è uno strumento di valutazione, che serve a poter intervenire preventivamente sul degrado dei monumenti, prima che il danno si verifichi, promuovendo la programmazione di interventi più efficaci e meno dispendiosi di quelli attivabili con il restauro per un danno già avvenuto.

Negli anni '70, con il "Piano per la Conservazione programmata dei Beni Culturali in Umbria", furono avviate delle sperimentazioni per valutare i fattori di degrado e di rischio dei beni artistici sull'intero territorio italiano. [2]

Grazie a quelle esperienze, con la Lg.n.84/90, si diede mandato all'Istituto Centrale del Restauro (ICR) di realizzare la "Carta del Rischio del Patrimonio Culturale Nazionale". Dal 2007, l'ICR è denominato Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro con la nuova sigla "ISCR".

Inoltre, oggi, esiste un sistema digitale di banche-dati alfanumeriche e cartografiche, chiamato Sistema Informativo Territoriale della Carta del Rischio (SIT CdR), che si occupa di tutti i Beni Culturali nazionali e che ha elaborato un modello probabilistico capace di:

- sintetizzare i dati relativi a danni e rischi,
- valutare le urgenze dei beni a rischio,
- gestire il controllo e la programmazione degli interventi prioritari sul territorio.

La numerosità di beni italiani è tale che il *danno* viene analizzato in termini di gerarchia degli interventi, sulla base di criteri di *gravità, estensione* e *urgenza*. [3]

Il rischio, che un evento dannoso possa verificarsi, viene analizzato, sintetizzando i fattori variabili in due indicatori di rischio: *vulnerabilità* e *pericolosità*, secondo tre domini:

1. **rischio statico-strutturale** – riguarda lo studio di possibili eventi calamitosi (terremoti, frane, inondazioni, valanghe, attività vulcaniche, erosione coste), che potrebbero influire sulla staticità dei monumenti.
2. **rischio ambiente-aria** – riguarda la valutazione di fattori climatici e microclimatici, di eventuali inquinanti dell'aria che potrebbero avere effetti negativi sull'ambiente.
3. **rischio antropico** – riguarda il rischio che potrebbe essere determinato dalla pressione del fattore umano. [4]

Condizioni ambientali di conservazione dei contenuti artistici

Con la UNI 10829/99, l'Italia ha regolamentato una metodologia di misurazione delle grandezze ambientali, termo-igrometriche e di illuminazione, più significative per la conservazione dei manufatti artistici. In introduzione, si avverte che una *corretta conservazione* è possibile solo se i beni artistici sono collocati in luoghi con condizioni ambientali controllate e mirate a limitare la velocità dei processi di degrado. Per conservare adeguatamente ogni tipo di materiale, occorre conoscerne le specifiche esigenze. Nell'Appendice A, in tabella, vengono definiti parametri ambientali e valori di riferimento consigliati. [5]

Standard di qualità del Museo/Contenitore d'arte

Fino al '98, ci si riferiva genericamente al patrimonio artistico *mobile* e *immobile* da conservare. Con il D.M. del 10 maggio 2001, viene ufficializzato l' "Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei". [6] Con l'adeguamento agli standard europei, si sposta l'attenzione sul *museo-ufficio*, che deve possedere caratteristiche e attrezzature con requisiti minimi irrinunciabili. Il testo di legge è suddiviso in più ambiti: l'Ambito VI è specifico della "Gestione e cura delle collezioni". [7]

Per i valori illuminotecnici raccomandati, i reperti sono suddivisi in quattro tipologie di materiale, per categorie omogenee di fotosensibilità, a cui corrispondono comuni esigenze di illuminamento. Secondo la stessa suddivisione, sono fornite altre grandezze illuminotecniche di riferimento relative a: esposizione energetica; dose di luce annuale; componente UV. In Appendice, vengono, inoltre, riportate le tabelle con i valori termoigrometrici consigliati per assicurare le condizioni ottimali di conservazione dei manufatti. [8]

OBIETTIVI E SCELTA DEL TEMA

Le motivazioni dello studio nascono dalle norme stesse, che auspicano la messa a punto di un modello-scheda, capace di recepire e gestire informazioni di base sullo stato di conservazione dei manufatti, nonché sul controllo periodico delle loro condizioni ambientali. Da qui, nasce l'esigenza di proporre lo studio di uno screening di base, preliminare e/o parallelo all'analisi dei rischi ambientali, una "metodologia di monitoraggio sperimentale" utile ai gestori dei musei, con le seguenti funzioni:

- costituire uno strumento rapido di monitoraggio periodico,
- ammortizzare costi e tempi di indagini lunghe e dettagliate,
- essere applicabile, attraverso una modulistica per schede, a qualsiasi organismo architettonico destinato a museo,
- individuare rapidamente criticità e punti di forza degli ambienti museali,
- fornire sintetiche valutazioni sulla posizione ideale o rischiosa dei reperti,
- fornire indicazioni per migliorare la qualità delle condizioni ambientali con interventi a basso impatto ambientale.

A tale scopo, metteremo in relazione *caratteristiche del museo* (contenitore d'arte) ed *esigenze di conservazione dei reperti* (contenuto artistico), confrontando i dati normativi. Affronteremo, inoltre, il concetto di *rischio*, attraverso l'esame della sua parte complementare, che definiremo "compatibilità".

Definizione di compatibilità ambientale nei musei

È usuale nella letteratura scientifica di settore ritrovare affiancate le questioni sull' "analisi del rischio" e sulla "compatibilità ambientale". In tale sede, però, i termini *compatibilità* e *rischio* sono in relazione. Pertanto, va spiegato il senso di questa bifronte-specularità. In generale, si definisce *compatibilità* la capacità che un oggetto ha di essere conciliabile con un altro. Due elementi sono compatibili tra loro, se il loro stare insieme è una condizione che non comporta effetti negativi, cioè se non esistono rischi per la sicurezza e l'integrità per nessuna delle parti.

Nel nostro caso, un reperto o manufatto artistico di collezione può essere definito compatibile con l'ambiente espositivo che lo contiene, se si trova nelle condizioni ideali di conservazione suggerite dalle norme, cioè se si verifica la cosiddetta "corretta conservazione" citata dalla UNI 10829/99.

In questo senso, concettualmente, la "non" compatibilità" produce l'effetto inverso di essere causa di rischio. Tuttavia, occorre precisare che esiste una differenza nelle procedure di valutazione:

- l' "analisi del rischio" è di tipo *probabilistico*, perché sintetizza numerose variabili possibili;
- la "compatibilità" è di tipo *reale*, in quanto risultante dal confronto tra i parametri di norma e i dati strumentali provenienti da un monitoraggio *in loco*.

L'analisi della compatibilità ambientale consiste nella valutazione dell'impatto reale, che l'ambiente circostante esercita sull'oggetto che deve essere protetto. Tale relazione è valida anche per l'impatto che il soggetto (per es. l'uomo) esercita sull'ambiente (museo o collezione).

METODOLOGIA

La metodologia proposta si articola attraverso indagini analitico-strumentali da effettuare con il supporto di schede, che sintetizzano i dati di norma. Si è assunto lo stesso lessico e gli stessi parametri delle norme vigenti, per stilare due tabelle utili alle operazioni di monitoraggio "ambiente-aria".

- Con la Tabella 1, l'operatore può effettuare lo "Screening analitico di base sullo stato di conservazione del Museo-Contenitore", in cui vengono prese in esame le componenti edilizie del museo. La scheda tiene conto del modello-standard per la schedatura conservativa dell'edificio-museo.
- Con la Tabella 2, l'operatore può effettuare lo "Screening diagnostico di base per la compatibilità ambientale nei beni architettonici museali". La scheda, in linea con le norme: UNI 10829/99 e D.M. 10/05/01, è utile per i rilievi nella sala espositiva per verificare se sussistono le condizioni ambientali di norma, interpretando i dati in termini di compatibilità/rischio.
- L'Allegato alla Tabella 2 serve da supporto allo screening diagnostico e analizza la "Compatibilità ambientale per la compresenza dei contenuti artistici". La scheda è stata redatta, riportando i parametri illuminotecnici e termoigrometrici raccomandati dalle norme.

Si mantiene la suddivisione dei reperti in quattro categorie omogenee di materiali (fotosensibilità) suggerita dall'AdI (D.M. 10/05/01) per i controlli illuminotecnici e si assimila anche per l'inserimento dei valori termoigrometrici.

Ciò per continuità di lessico e ai soli fini strumentali di raggruppare reperti con esigenze ambientali comuni. Ovviamente, la fotosensibilità non è l'unico parametro di valutazione.

PROCEDURA

Fase 1. Screening analitico di base sullo Stato di Conservazione del Museo-Contenitore (Vedi Tabella 1). Compilare la Tabella 1 secondo le richieste. Assegnare al bene il (CUP) Codice Univoco Provvisorio, da trascrivere su tutte le schede. Inserire la data del rilevamento in (gg/mm/aaaa), riportare le informazioni sugli elementi danneggiati al momento della schedatura. Eseguire un rilievo analitico, esaminando le componenti edilizie del manufatto architettonico, secondo i seguenti parametri: contesto urbano, impianti, strutture, finiture e decorazioni.

Il danno va così indagato: segnalare localizzazione ed eventuali note descrittive. Indicare alla voce (I) se è stato possibile l'ispezione. Indicare con un numero da 1 a 5, se l'elemento è stato analizzato in parte o in toto (1=1-20%, 2=21-40%; 3=41-60%; 4=61-80%; 5=81-100%).

Il danno è distinto in tipologie dell'ambito ambiente-aria, la scala d'intensità è distinta in *gravità*, *estensione, urgenza*. La gravità è indicata da 0 a 2, dove 0 è l'assenza di danni; 1 è un danno lieve o medio, 2 è un danno grave, gravissimo. Indicare l'estensione con L se il danno è localizzato, con D se è diffuso.

I numeri da 20 a 100 indicano le percentuali di superficie interessata dal danno. Indicare da 1 a 3 i livelli di urgenza (basso, medio, alto).

Fase 2. Screening diagnostico di base per la compatibilità ambientale nei beni architettonici museali. Compilare la Tabella 2 secondo le richieste, seguendo le indicazioni dell'Allegato alla Tabella 2. Procedere tramite strumentazione alla misurazione dei parametri illuminotecnici e termo-igrometrici (Vedi Tabella 2).

Fase 3. Classificazione della Sala/Contenitore. Inserire i dati in Tabella 2 nelle rispettive fasce di pertinenza, per determinare la categoria di opere che l'ambiente può ospitare (Vedi Allegato Tabella 2).

Fase 4. Classificazione del Contenuto Artistico. Classificare i manufatti esposti nella sala espositiva, in base alle quattro categorie omogenee di riferimento dell'All. Tab.2.

Fase 5. Verifica Compatibilità e Rischio. Controllare i valori illuminotecnici e termoigrometrici rilevati *in situ*, confrontarli con la norma, verificare compatibilità ed eventuali rischi per le opere esposte.

Fase 6. Classificazione dei livelli di compatibilità/rischio. Classificare i livelli di compatibilità/rischio secondo la Tabella 2: - compatibilità 0 - rischio max,

- compatibilità 1 - rischio 4,
- compatibilità 2 - rischio 3,
- compatibilità 3 - rischio 2,
- compatibilità 4 - rischio 1,
- compatibilità max - rischio 0.

DIFFICOLTA' E PUNTI DI DEBOLEZZA

Lo studio non ha la pretesa di essere onnicomprensivo o sostitutivo delle norme vigenti, si inserisce come rapido strumento di monitoraggio periodico, col fine di proporre agli operatori una scheda modello di facile compilazione. Lo studio è appena avviato, pertanto i risultati vanno ancora considerati in fieri. Di fatto, esistono oggettive difficoltà nel sintetizzare in un unico documento le indicazioni normative, che provengono da più strumenti legislativi e riguardano aspetti specifici della questione ambientale sui musei. Il rischio è, certamente, quello non trovare il giusto equilibrio tra i vari parametri da analizzare.

CONCLUSIONI

Questa metodologia di analisi consente di valutare rapidamente, per livelli di C/R, se una sala è idonea alla funzione espositiva; individuare le opere con simili esigenze di conservazione (compatibilità tra le opere); verificare il tipo di opere che un ambiente può ospitare in base alle sue caratteristiche ambientali (compatibilità ambiente-opere).

- Compatibilità 0/rischio max - i valori rilevati nella sala non sono conformi alla norma. Rivedere destinazione funzionale o effettuare interventi di adeguamento su impianti e attrezzature.
- Compatibilità 1/rischio 4 - rischio per la collezione che non può essere spostata altrove. Effettuare indagini più approfondite per intervenire su impianti e attrezzature;
- Compatibilità 2/rischio 3 - rischio per la collezione. Se può essere spostata, collocare la collezione in ambiente più idoneo;
- Compatibilità 3/rischio 2 - compatibilità della sala con altra categoria di collezione. Fornire indicazioni sulla flessibilità della sala per eventuali modifiche dell'allestimento;
- Compatibilità 4/rischio 1 - parametri nella norma con riserve. Effettuare indagini per lievi modifiche sugli impianti;
- Compatibilità max/rischio 0 - compatibilità della sala con le opere contenute. Situazione ottimale, nessun orientamento.

QUESTIONI APERTE

Lo studio è stato alleggerito dalle questioni sugli inquinanti dell'aria e sul rischio antropico, che andrebbero meglio indagate studiando le relazioni di compatibilità tra contenitore d'arte, contenuto artistico e antropico e interpretando il fattore umano non solo come elemento di alterazione delle condizioni ambientali, ma come "fruitore dell'opera d'arte" con proprie esigenze di comfort.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. D.M. 10 maggio 2001. "Atto di indirizzo sui criteri tecnico - scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei"
2. AA.VV. Piano pilota per la conservazione programmata dei beni culturali in Umbria, BBCCAA, ICR, Roma 1976
3. Accardo G. , "La schedatura conservativa: esperienze dell'ICR in relazione alla Carta del rischio". I Seminario Nazionale sulla Catalogazione - ICCD 24/11/1999
4. «www.cartadelrischio.it/ita/modellologico»; «www.scalve.it/giornatastudio/CartaRestauro»
5. UNI 10829 Luglio 1999 "Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi".
6. D'Orso A., La Gennusa M., Rizzo G.,Scaccianoce G., "Controllo termoigrometrico indoor negli spazi museali: Analisi di un edificio in evoluzione climatica libera". Atti del 7° Congresso Naz. CIRIAF 30-31/03/07-Perugia
7. Corgnati S.P., Filippi M, Capozzoli A, Mazzei P., "Potenzialità, limiti e problematiche di controllo termoigrometrico in ambienti museali: risulati di esperienze in campo". Convegno AICARR "Tecnologie impiantistiche per i musei", Roma 2005
8. Costanzo S., Cusumano A., Giaconia C.&G."Preservation of the artistic heritage within the seat of the Chancellorship of the University of Palermo. (...) Italian Standards", in Building and Environment, 2006, vol.41, n.12, pp.1847-1859.

Tabella 1: Screening Analitico di Base sullo Stato di Conservazione del Museo-Contenitore – pag.1

DOMINIO AMBIENTE- ARIA	SCREENING ANALITICO DI BASE SULLO STATO DI CONSERVAZIONE DEL MUSEO-CONTENITORE	TABELLA 1
CUP □□□□□□□□		
data □□/□□/□□□□	(gg / mm / aaaa)	

COMPONENTI EDILIZIE	LOCALIZZAZIONE E INTENSITA' DEL DANNO																
				Gravità			Estensione %						Urgenza		
TIPOLOGIA	I	LOCALIZZAZIONE	ESPOSIZIONE	0	1	2	L/D	20	40	60	80	100	1	2	3
CONTESTO URBANO															
ZONA	0		Zona Industriale												
	1		Fascia costiera												
	2		Area Metropolitana												
	3		Altitudine > 1000 m												
	4														
	5		Note												
IMPIANTI															
IDRICO	0		Assenza												
	1		Inefficienza												
	2		Inadeguatezza												
	3														
	4		Note												
	5														
ELETTRICO	0		Assenza												
	1		Inefficienza												
	2		Inadeguatezza												
	3														
	4		Note												
	5														
CONDIZIONAMENTO	0		Assenza												
	1		Inefficienza												
	2		Inadeguatezza												
	3														
	4		Note												
	5														
STRUTTURE															
FONDAZIONI	0		Danno generico	A											
	1		Disgregazione materiali	B											
	2		Umidità	C											
	3		Attacchi Biologici	D											
	4		Alterazione strati superficiali	E											
	5		Parti mancanti	F											
VERTICALI	0		Danno generico	A											
	1		Disgregazione materiali	B											
	2		Umidità	C											
	3		Attacchi Biologici	D											
	4		Alterazione strati superficiali	E											
	5		Parti mancanti	F											
ORIZZONTALI	0		Danno generico	A											
	1		Disgregazione materiali	B											
	2		Umidità	C											
	3		Attacchi Biologici	D											
	4		Alterazione strati superficiali	E											
	5		Parti mancanti	F											
COPERTURE E SMALTIMENTO DELLE ACQUE METEORICHE	0		Danno generico	A											
	1		Disgregazione materiali	B											
	2		Umidità	C											
	3		Attacchi Biologici	D											
	4		Alterazione strati superficiali	E											
	5		Parti mancanti	F											

Operatore

n. 1

DOMINIO AMBIENTE- ARIA	SCREENING ANALITICO DI BASE SULLO STATO DI CONSERVAZIONE DEL MUSEO-CONTENITORE	TABELLA 1
CUP □□□□□□□□		
data □□/□□/□□□□	(gg / mm / aaaa)	

COMPONENTI EDILIZIE	LOCALIZZAZIONE E INTENSITA' DEL DANNO																
					Gravità			Estensione %						Urgenza		
TIPOLOGIA	I	LOCALIZZAZIONE	ESPOSIZIONE		0	1	2	L/D	20	40	60	80	100	1	2	3
COLLEGAMENTI VERTICALI	0		Danno generico	A												
	1		Disgregazione materiali	B												
	2		Umidità	C												
	3		Attacchi Biologici	D												
	4		Alterazione strati superficiali	E												
	5		Parti mancanti	F												
DECORAZIONI																
PAVIMENTI INTERNI	0		Danno generico	A												
	1		Disgregazione materiali	B												
	2		Umidità	C												
	3		Attacchi Biologici	D												
	4		Alterazione strati superficiali	E												
	5		Parti mancanti	F												
PAVIMENTI ESTERNI	0		Danno generico	A												
	1		Disgregazione materiali	B												
	2		Umidità	C												
	3		Attacchi Biologici	D												
	4		Alterazione strati superficiali	E												
	5		Parti mancanti	F												
RIVESTIMENTI E DECORAZIONI INTERNE	0		Danno generico	A												
	1		Disgregazione materiali	B												
	2		Umidità	C												
	3		Attacchi Biologici	D												
	4		Alterazione strati superficiali	E												
	5		Parti mancanti	F												
RIVESTIMENTI E DECORAZIONI ESTERNE	0		Danno generico	A												
	1		Disgregazione materiali	B												
	2		Umidità	C												
	3		Attacchi Biologici	D												
	4		Alterazione strati superficiali	E												
	5		Parti mancanti	F												
INFISSI INTERNI	0		Danno generico	A												
	1		Disgregazione materiali	B												
	2		Umidità	C												
	3		Attacchi Biologici	D												
	4		Alterazione strati superficiali	E												
	5		Parti mancanti	F												
INFISSI ESTERNI	0		Danno generico	A												
	1		Disgregazione materiali	B												
	2		Umidità	C												
	3		Attacchi Biologici	D												
	4		Alterazione strati superficiali	E												
	5		Parti mancanti	F												

Note

Operatore

n.2

Tabella 2: Screening Diagnostico di Base per la Compatibilità Ambientale nei Beni Architettonici Museali

DOMINIO AMBIENTE- ARIA	SCREENING DIAGNOSTICO DI BASE PER LA COMPATIBILITA' AMBIENTALE NEI BENI ARCHITETTONICI MUSEALI	TABELLA 2
CUP □□□□□□□□		

data □□/□□/□□□□	(gg / mm / aaaa)	dati identificativi	SALA n.

CONTROLLO ILLUMINOTECNICO								CONTROLLO TERMO-IGROMETRICO						
R_i	C_i	N	E_{max}	LO	UV_{max}	UVR_{max}	$UVR_{max\ tot}$	T_0	ΔT_{max}	UR	ΔUR_{max}	N	C_a	R_a
		1	**>300** tranne stucchi, smalti, vetri instabili, fossili, plastiche	**NR**	**NR**	**NR**	**NR**	**19-24**	**1,5**	**20-60** tranne ferri corrosi, vetri instabili	**6**	**1**		
		2	**150**	**500.000**	**75**	**<1,2**	**10**	**19-24**	**1,5**	**40-60**	**4**	**2**		
		3	**50**	**150.000**	**75**	**<0,4**	**3**	**4-10**	**1,5**	**30-50** tranne materiali etnografici	**5**	**3**		
		4	**50**	**50.000**	**10**	**<0,05**	**1**	**19-24** tranne documenti di carta ed erbari	**1,5**	**40-50**	**3**	**4**		

CLASSIFICAZIONE DEI LIVELLI DI COMPATIBILITA'/RISCHIO					
O_i	**Risultati dello Screening**	**R**	**C**	**Scala degli interventi prioritari**	O_a
	Parametri della sala fuori norma	**5**	**0**	Rivedere la destinazione funzionale della sala	
	Rischio per la collezione che non può essere spostata altrove	**4**	**1**	Indagine specifica per modifiche agli impianti	
	Rischio per la collezione che può essere spostata	**3**	**2**	Spostare la collezione in ambiente idoneo	
	Compatibilità della sala con altra categoria di collezione	**2**	**3**	Indicazioni sulle flessibilità della sala per eventuali modifiche dell'allestimento	
	Parametri della sala nella norma con riserve	**1**	**4**	Indagine specifica per lievi interventi sugli impianti	
	Compatibilità della sala con le opere contenute	**0**	**5**	Situazione Ottimale – nessun orientamento	

Ri – Rischio illuminotecnico
Ci – Compatibilità illuminotecniche
N – Categoria di opera presente
E_{max} – Valore massimo dell'Illuminamento [lx]
LO_{max} – Valore massimo della Dose annuale di luce [Max lx · h/anno]
UV_{max} - Radianza max - Quantità massima di Radiazione Ultravioletta associata al flusso luminoso [watt/m^2]
UVR – Radianza. Componente Ultravioletta – calcolata in valore assoluto [watt/m^2]
UVR tot – Densità di energia totale. Radianza totale max

T_0 – Temperatura dell'aria [°C]
ΔT_{max} - Escursione massima giornaliera della temperatura dell'aria [°C]
UR – Umidità Relativa dell'aria[%]
ΔUR_{max} – Escursione massima giornaliera di umidità relativa [%]
N – Categoria di opera presente
Ca – Compatibilità termo-igrometriche
Ra – Rischio termo-igrometrico

Note

Operatore

n. 3

Allegato Tabella 2: Compatibilità Ambientale per la Compresenza dei Contenuti Artistici

DOMINIO AMBIENTE- ARIA	COMPATIBILITA' AMBIENTALE PER LA COMPRESENZA DEI CONTENUTI ARTISTICI	ALLEGATO TABELLA 2
CUP □□□□□□□□		
data □□/□□/□□□□	**(gg / mm / aaaa)**	

CONTENUTO ARTISTICO		**CONTENITORE D'ARTE**						
CARATTERISTICHE OPERE		**VALORI ILLUMINOTECNICI**			**VALORI TERMO-IGROMETRICI**			
CATEGORIA	**TIPOLOGIA MATERIALI**	**E_{max} [lx]**	**UV_{max} [µW/lm]**	**UVR [µW/cm²]**	**T_0 °C**	**ΔT_{max}**	**UR %**	**ΔUR_{max}**
1	**MATERIALI INORGANICI**	**E_{max}** >300 tranne stucchi, smalti, vetri instabili, fossili, plastiche	**UV_{max}** NR	**UVR** NR	**T_0** 19-24	**ΔT_{max}** 1,5	**UR** 20-60	**ΔUR_{max}** 6
	MOSAICI IN PIETRA NON POROSI, FOSSILI, COLLEZIONE DI PIETRE							
	CERAMICHE NON SMALTATE E INVETRIATE, GRES, TERRACOTTA, TEGOLE							
	VETRI, VETRATE STABILI							
	MATERIE PLASTICHE						30-50	
	VETRATE POLICROME, VETRI INSTABILI, IRIDESCENTI, SENSIBILI, MOSAICI DI VETRO						40-45	
	METALLI E LEGHE LEVIGATI (ottone, argento, peltro, piombo, rame, ori non smaltati, armature, armi)						<45	
	COLLEZIONI MINERALOGICHE, MARMI, PIETRE, ROCCE, METEORITI POROSI STABILI				≤30		45-60	
2	**MATERIALI ORGANICI STABILI**	**E_{max}** 150	**UV_{max}** 75	**UVR** <1,2	**T_0** 19-24	**ΔT_{max}** 1,5	**UR** 40-60	**ΔUR_{max}** 4
	PITTURE A OLIO, TEMPERE, AFFRESCHI, SINOPIE (STACCATE)				inverno max 6 estate max 25			
	AVORI, CORNI, OSSI, CORNA, UOVA, NIDI, COLLEZIONI ENTOMOLOGICHE							
	LEGNO NON DIPINTO, VIMINI, CORTECCIA							
3	**MATERIALI ORGANICI INSTABILI**	**E_{max}** 50	**UV_{max}** 75	**UVR** <0,4	**T_0** 19-24	**ΔT_{max}** 1,5	**UR** 40-60	**ΔUR_{max}** 6
	TESSUTI, TENDAGGI, ARAZZI, TAPPETI, TAPPEZZERIA IN STOFFA, COSTUMI, CARTA							
	MATERIALI ETNOGRAFICI, STORIA NATURALE O TINTI CON PRODOTTI VEGETALI							
	PELLICCE, PIUME, ANIMALI IMPAGLIATI				15-21			5
	ERBARI E COLLEZIONI BOTANICHE				21-23			2
	DISEGNI, ACQUERELLI, PASTELLI E SIMILI SU SUPPORTO CARTACEO						50-60	2
	PELLI, PERGAMENE, CUOIO						50-60	
	DOCUMENTI SU CARTA, LIBRI, MANOSCRITTI, VOLUMI A STAMPA						50-60	
	PENNARELLI, GUAZZI SU TELA						35-50	
4	**MATERIALI ORGANICI FORTEMENTE INSTABILI**	**E_{max}** 50	**UV_{max}** 10	**UVR** <0,05	**T_0** 19-24	**ΔT_{max}** 1,5	**UR** 40-60	**ΔUR_{max}** 4
	INSETTI E SCATOLE ENTOMOLOGIGHE							
	LEGNO DIPINTO, SCULTURE POLICROME							
	DISCHI E NASTRI MAGNETICI				10-21			
	SETA						50-60	
	LACCHE, MOBILI INTARSIATI, INCHIOSTRI O PIGMENTI A RISCHIO DI SCOLORITURA						50-60	
	FILM E FOTOGRAFIE A COLORI				-5-+15		30-50	
	ANIMALI, ORGANI ESSICCATI				21-23		20-35	
	FOTOGRAFIE B/N				2-20*		20-30	

E_{max} – Valore massimo dell'Illuminamento [lx]
UV_{max} - Radianza max - Quantità massima di Radiazione Ultravioletta associata al flusso luminoso [watt/m²]
UVR – Radianza. Componente Ultravioletta in valore assoluto [watt/m²]

T_0 – Temperatura dell'aria [°C]
ΔT_{max} - Escursione massima giornaliera della temperatura dell'aria [°C]
UR – Umidità Relativa dell'aria[%]
ΔUR_{max} – Escursione massima giornaliera di umidità relativa [%]

Nota: Gli spazi vuoti si considerino corrispondenti all'intestazione di pertinenza della categoria di materiale.

n. 4

IL COMPORTAMENTO PASSIVO DEGLI EDIFICI STORICI: UNA PROPOSTA DI CATEGORIZZAZIONE.

Franco Cipriani

Dipartimento di Fisica Tecnica, Università "La Sapienza" Roma.

SOMMARIO

L'Italia è una nazione con un patrimonio edilizio storico assai rilevante. Pertanto è frequente il caso che i progettisti operino su edifici esistenti con l'esigenza di un adeguamento delle condizioni di confort e funzionalità correlate agli usi dell'edificio. In tali situazioni l'inserimento dei sistemi impiantistici risulta spesso difficoltoso, ciò che porta ad adottare soluzioni di compromesso.

Si osserva però che negli edifici storici si impiegavano le tecnologie disponibili per la creazione di condizioni di confort almeno sufficienti e che le soluzioni così elaborate erano fondamentalmente basate sul comportamento passivo dell'edificio nel suo insieme e delle sue parti e componenti.

Questa memoria fa parte di un lavoro di ricerca che si propone di individuare metodi e tecniche per effettuare una analisi sistematica di tale comportamento passivo allo scopo di definirlo e caratterizzarlo, per poter poi intervenire progettualmente, alla luce delle conoscenze e tecnologie attualmente disponibili, per ripristinarlo e potenziarlo riducendo (o al limite azzerando) l'impattante presenza degli impianti.

La prima fase di questo lavoro riguarda l'individuazione di categorie di edifici storici che possano costituire una base analitica di impostazione del lavoro. La presente memoria illustra una prima proposta di categorizzazione articolata su tre elementi fondamentali del comportamento passivo: inerzia termica, irraggiamento solare e ventilazione.

1. INTRODUZIONE.

Dal punto di vista dell'impiego dell'energia per la climatizzazione possiamo definire come edifici storici gli edifici realizzati prima dello sviluppo e dell'introduzione di sistemi impiantistici di riscaldamento e di raffrescamento attivi, individuabili e definibili in rapporto a due elementi:

- la produzione industriale di componenti,
- il consumo di forme di energia derivanti da fonti in larga parte non rinnovabili.

Sulla base di questa definizione l'Italia è una nazione con un patrimonio edilizio quantitativamente assai rilevante e spesso anche di grande valore qualitativo. Pertanto non è infrequente il caso in cui i progettisti si trovano ad operare su edifici esistenti sia allo scopo di restaurarli, sia allo scopo di rivitalizzarli inserendovi destinazioni d'uso e funzioni attuali. Quando ciò accade è normalmente richiesto anche un adeguamento agli standard correnti per quanto riguarda le condizioni di confort e le funzionalità correlate ai nuovi usi dell'edificio. Ciò comporta la necessità di sistemi impiantistici di differenti livelli di complessità, i quali di solito risultano di difficoltoso inserimento nella struttura edilizia preesistente, portando a soluzioni che possono risultare molto dispendiose, e/o molto impattanti sulla qualità architettonica e storica dell'edificio stesso, e/o di compromesso (tipicamente a scapito della funzionalità complessiva dell'impianto).

Tuttavia gli edifici storici erano spesso il frutto di una sapienza costruttiva che impiegava le tecnologie disponibili all'epoca della realizzazione dell'edificio anche ai fini della creazione di un microclima interno tale da realizzare condizioni di confort almeno sufficienti [1-4]. Le misure adottate a questo scopo erano fondamentalmente basate sul comportamento passivo dell'edificio nel suo insieme e delle sue parti e componenti.

2. SCOPO DELLO STUDIO.

È parso quindi opportuno tentare una analisi sistematica di tale comportamento allo scopo di definirlo, caratterizzarlo ed eventualmente intervenire, alla luce delle conoscenze e tecnologie attualmente disponibili, per ripristinarlo e potenziarlo riducendo (o al limite azzerando) la presenza degli impianti e dei relativi impatti (architettonico, acustico, ambientale, paesaggistico, energetico, ecc.).

Il primo obiettivo che ci si è posti nell'ambito di questo lavoro è stato quello di individuare delle categorie di edifici storici che costituissero una base analitica di impostazione del lavoro.

Un approccio di natura architettonica ha da subito evidenziato la presenza di un numero di variabili tale da non consentire un efficace inquadramento tipologico dell'edificio in un numero controllabile di categorie.

Si è pertanto rivolta l'attenzione ad un approccio direttamente connesso al comportamento passivo dell'edificio, che è stato schematizzato in funzione di tre elementi ritenuti fondamentali:

- la struttura muraria e il suo comportamento inerziale
- lo sfruttamento dell'irraggiamento solare
- il modello di ventilazione adottato.

Molti altri elementi sono da sempre stati presi in considerazione (venti, vegetazione, acqua, ecc.), ma in sostanza questi ultimi venivano utilizzati per "amplificare" il funzionamento di quelli fondamentali.

Tale metodologia, tra l'altro, consente di analizzare l'edificio anche per parti, fatto che risulta essenziale in tutti quei casi in cui l'organismo edilizio è molto articolato sia dal punto di vista architettonico-spaziale, sia dal punto di vista funzionale. Le categorie conseguenti all'analisi così eseguita, inoltre, risultano indipendenti dal contesto climatico e culturale, come viene dimostrato negli esempi riportati in seguito, ciò che le rende utilizzabili anche al di fuori del contesto italiano sebbene il contesto nazionale sia preso di riferimento per le valutazioni di seguito riportate.

In questo lavoro si illustra pertanto una proposta di categorizzazione degli edifici storici basata su tale metodologia.

3. IL COMPORTAMENTO INERZIALE.

Gli edifici storici sono stati realizzati in un amplissimo arco temporale sull'intera superficie del pianeta con le tecnologie disponibili nelle rispettive epoche e aree. Tuttavia, dal punto di vista del comportamento passivo il fattore probabilmente più rilevante e anche più ricorrente è quello legato al comportamento inerziale delle frontiere perimetrali. Tale fattore è strettamente correlato alla massa, come era noto tanto a chi costruì in pietra, quanto a chi costruì in laterizio o adobe [5-6]. Per questa ragione una prima serie di categorie è stata elaborata in funzione di:

- capacità di accumulo dell'involucro dell'edificio espressa per mezzo della massa
- effetto inerziale del terreno nel caso in cui l'edificio sia del tutto o parzialmente interrato.

Le categorie che si sono individuate sono quattro:

a. murature leggere, con massa $M \leq 1.000$ kg/m^2;
b. murature pesanti, con massa $M > 1.000$ kg/m^2;
c. del tutto o parzialmente interrato, con capacità di accumulo affidata esclusivamente o prevalentemente al terreno;
d. del tutto o parzialmente interrato, con capacità di accumulo derivante dall'azione integrata di terreno e muratura.

Lo schema seguente sintetizza tali categorie.

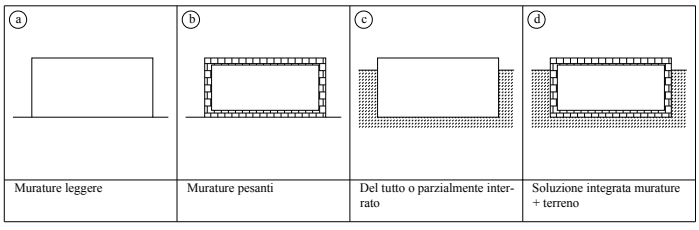


Fig. 1. Categorie determinate dal comportamento inerziale.

Il valore limite della massa è stato determinato sulla base del D.M. 26 giugno 2009 (all. A comma 6.2) che definisce prestazioni e qualità prestazionale degli involucri in funzione di sfasamento e fattore di decremento. In particolare le prestazioni sono definite ottime e la qualità prestazionale di I classe quando si ha uno sfasamento S > 12 h e un decremento Fa < 0,15.

Utilizzando la normativa UNI 13786:2008 (per il calcolo di fattore di decremento e sfasamento) e la UNI 10351:1994 (per le caratteristiche dei materiali) e riferendosi alla costituzione di murature tipiche negli edifici storici [7-10], si è determinato il peso mediamente necessario per ottenere tali prestazioni e questo dato, assunto pari a 1.000 kg m^{-2}, è stato utilizzato come limite (cfr. tab. 1). Tale valore, dedotto quindi dalla normativa, è stato assunto come valore minimo quando l'effetto dovuto all'inerzia termica diviene determinante (assunto che rimane valido anche in quei casi in cui lo spessore e quindi la massa delle murature sono determinati anche da ragioni statiche, ma che naturalmente è più probante quando le ragioni statiche non sussistono). In altri termini nella tabella 1 sono stati definiti dei valori limite di spessore murario e, di conseguenza, di massa: ad ogni muratura, infatti, corrisponde un diverso spessore al di sotto del quale le sue prestazioni non rientrano nei limiti previsti dalla normativa, in riferimento a decremento e sfasamento.

Tabella 1: analisi delle murature in funzione dei valori minimi di decremento e sfasamento

Tipo di muratura	**Spessore** [cm]	**Massa** [kg/m^2]	**Fattore di decremento**	**Sfasamento**[h]
Muratura in calcare	55	1045	0.14	12.65
Muratura in granito	65	1625	0.12	12.46
Muratura in tufo leggero	44	660	0.15	13.11
Muratura in tufo pesante	50	1150	0.15	12.10
Muratura in laterizi pieni	42	840	0.14	13.17
Muratura a sacco	43	814	0.15	12.70

Per comprendere se tale valore trova riscontro nella realtà le stesse murature (riportate in tab. 2 in funzione di alcune tipiche aree di diffusione sul territorio italiano) sono state valutate in rapporto agli spessori che mediamente e tipicamente si riscontrano. I risultati di tale valutazione sono riportati nella tab. 3 dalla quale si evince l'importanza delle sezioni murarie perimetrali dal punto di vista del comportamento passivo degli edifici storici, si può infatti notare che ogni struttura studiata (sebbene si tratti di valori mediamente tipici) ha dei valori di sfasamento e di decremento che superano largamente le prescrizioni normative attuali.

Tabella 2: murature in funzione della localizzazione sul territorio italiano.

Tipo di muratura	**Localizzazione geografica**
Muratura in calcare	Sicilia; Basilicata; Nord-Ovest Italia;
Muratura in granito	Nord Sardegna; Piemonte;
Muratura in tufo leggero	Lazio; Toscana;
Muratura in tufo pesante	Lazio; Toscana;
Muratura in laterizi pieni	Centro-Nord Italia
Muratura a sacco	

Tabella 3: analisi delle murature in funzione degli spessori mediamente riscontrabili

Tipo di muratura	**Spessore** [cm]	**Massa** [kg/m^2]	**Fattore di decremento**	**Sfasamento** [h]
Muratura in calcare	80	1520	0.04	18.44
Muratura in granito	80	2000	0.06	15.19
Muratura in tufo leggero	60	900	0.05	18.20
Muratura in tufo pesante	80	1840	0.03	19.29
Muratura in laterizi pieni	60	1200	0.04	19.03
Muratura a sacco	70	1360	0.02	21.60

4. L'IRRAGGIAMENTO SOLARE.

La principale fonte di energia per quanto concerne il comportamento passivo di un edificio è quella solare, rispetto alla quale i progettisti e i costruttori si sono sempre posti in maniera differenziata a seconda della zona climatica nella quale si opera. Nel complesso, tuttavia, si possono individuare tre comportamenti di base:

1. la difesa dall'irraggiamento, facendo in modo di non consentirne l'ingresso, anzi rinviandolo per quanto possibile;
2. lo sfruttamento controllato dell'irraggiamento, disponendo schermi (relativamente ai nostri interessi hanno rilevanza quelli strutturali, cioè integrati nella struttura o nell'involucro dell'edificio) in corrispondenza delle aperture. In questa categoria rientra anche lo sfruttamento indiretto dell'irraggiamento;
3. lo sfruttamento diretto dell'irraggiamento, per mezzo di aperture (vetrate o meno) che consentono l'ingresso delle radiazioni in modo controllato esclusivamente dalla dimensione delle aperture stesse (modo che talora è determinato anche dalla tecnologia costruttiva).

Di seguito è riportato lo schema delle categorie individuate.

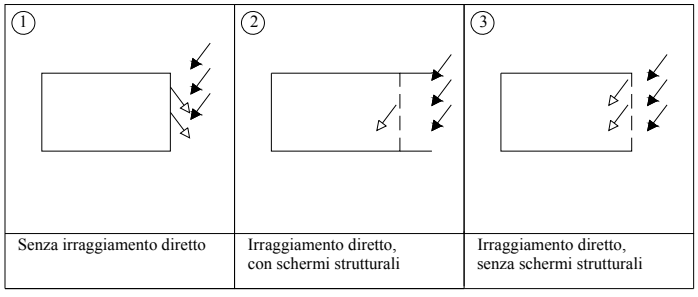


Fig. 2. Categorie determinate dalle modalità di sfruttamento dell'energia solare.

5. LA VENTILAZIONE.

Il comportamento passivo di un edificio è infine fortemente determinato dal moto dell'aria, in particolare quella che entra dall'esterno. Da questo punto di vista, in funzione dell'epoca, della zona climatica e delle risorse tecnologiche, sono state elaborate moltissime soluzioni, alcune delle quali anche molto articolate, per poter controllare sia quantitativamente, sia qualitativamente l'afflusso dell'aria esterna. Gli elementi più rilevanti riguardano le aperture di ingresso e quelle (quando ci sono) per l'espulsione dell'aria viziata e/o riscaldata prodotta all'interno, fatto rispetto al quale hanno rilevanza anche i moti convettivi che si ingenerano. Il criterio utilizzato per la categorizzazione è stato quindi quello della schematizzazione del flusso dell'aria, così come si illustra nella figura seguente.

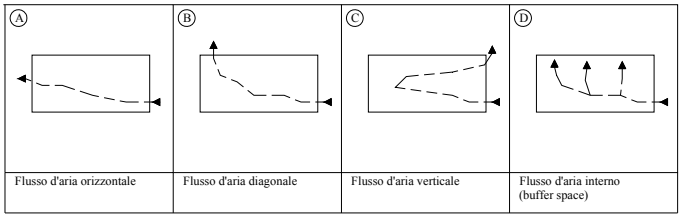


Fig. 3. Categorie determinate dalla ventilazione.

6. LA MATRICE DI RIFERIMENTO.

In questo modo si è creata una matrice di 48 categorie entro la quale è possibile collocare gli edifici storici, individuandone il comportamento passivo di base per mezzo di una serie di tre caratteri alfanumerici. Tale matrice è riportata nella figura 4 alla pagina seguente, mentre successivamente si illustrano alcune categorie per mezzo di esempi, sintetizzati in schede.

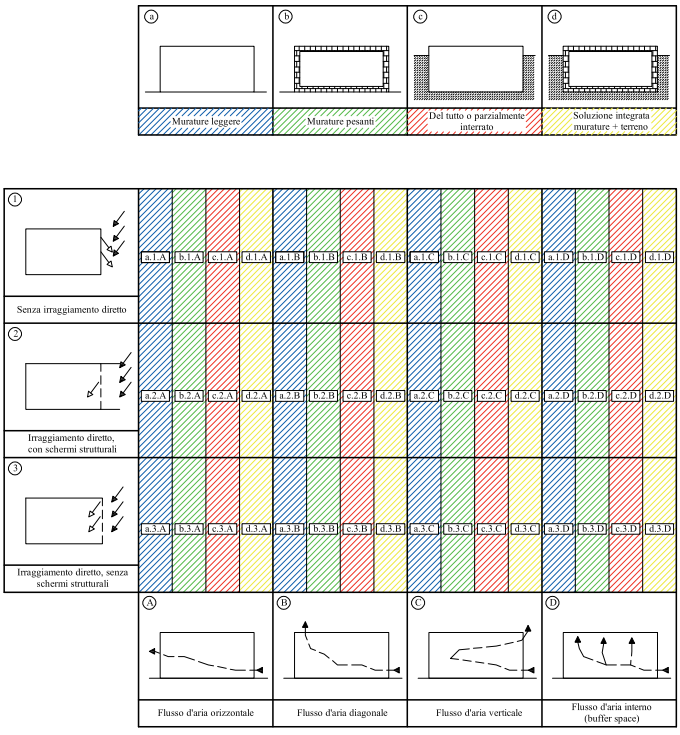


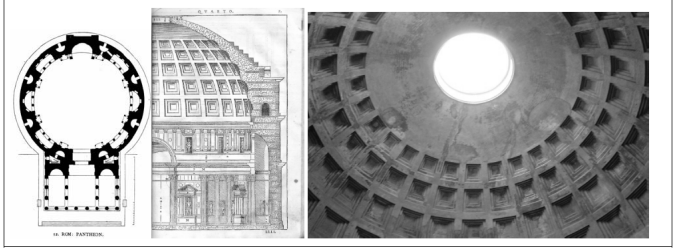
Fig. 4 – Matrice delle categorie.

7. ESEMPI.

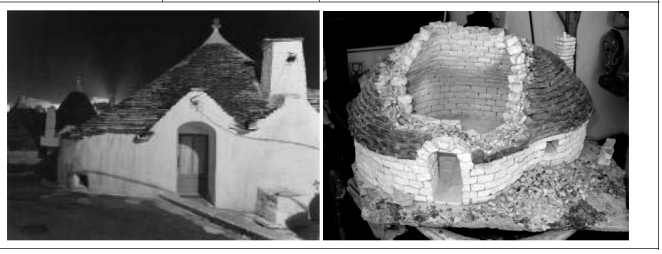
Di seguito si riportano tre esempi di applicazione della matrice di categorizzazione, riguardanti differenti tipologie di edificio, ma anche diverse epoche, tecnologie costruttive e localizzazioni sul territorio nazionale.

Dalla difformità degli esempi appare anche chiaro che la limitazione territoriale non ha un reale valore e che in effetti la metodologia può essere applicata anche in altri contesti climatici e tecnologici.

Edificio e localizzazione	Epoca storica	Categoria comportamento passivo
Pantheon, Roma, Italia	II sec. d.C.	b.2.B



Edificio e localizzazione	Epoca storica	Categoria comportamento passivo
Trulli, Alberobello-Puglia, Italia	varia	b.1.D



Edificio e localizzazione	Epoca storica	Categoria comportamento passivo
Carcere, S. Stefano, Italia	XVIII sec.	b.2.A



8. ESEMPIO D'USO DELLE CATEGORIE: L'ACQUARIO ROMANO.

La rappresentazione semplificata del comportamento passivo di un edificio o di una sua parte punta ad una prima rapida valutazione delle potenziali linee di intervento, le quali tuttavia non possono non tenere conto nelle fasi di approfondimento progettuale di alcuni elementi e fattori aggiuntivi generalmente specifici dell'edificio analizzato: a tal proposito, a scopo esemplificativo, è stato preso in esame l'Acquario Romano, edificio storico realizzato nella seconda metà dell'800 a Roma.

La costruzione dell'Acquario iniziò nel 1884 su progetto di Ettore Bernich, architetto romano, e venne inaugurato il 29 maggio 1887. Innumerevoli furono le destinazioni d'uso che si successero all'interno dell'edificio: da stabilimento di piscicoltura e scuola di ittiogenia (1890) a sala per concerti ed intrattenimenti (1900), da teatro e sala cinematografica (1930) a deposito per gli scenari del teatro dell'Opera (1984). Attualmente l'Acquario è la sede della Casa dell'Architettura. [11-12]



Fig.5. Acquario Romano: vista prospettica

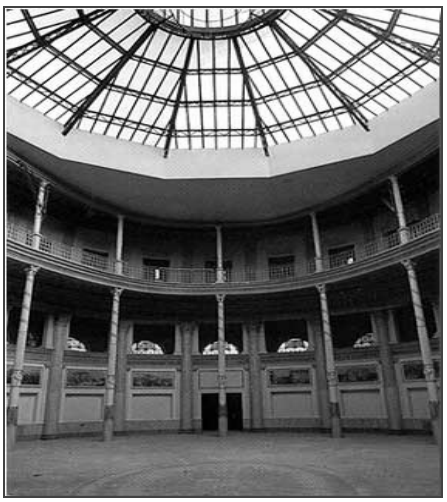
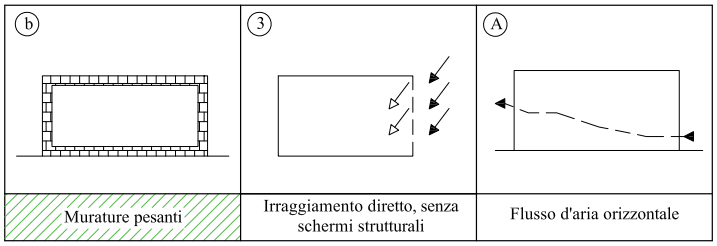


Fig.6. Acquario Romano: vista interna

La tipologia formale dell'Acquario è determinata dalla combinazione di due volumi geometrici, il corpo cilindrico della sala ad anfiteatro ed il parallelepipedo del portico d'ingresso: è un edificio a pianta centrale, con un limitato numero di piani, di cui solo due denunciati all'esterno; presenta una impostazione su basamento con scala antistante di raccordo e definizione dell'ingresso attraverso un arco trionfale che sopravanza nettamente la copertura.

Nell'ambito del discorso qui svolto l'Acquario Romano è chiaramente e immediatamente collocabile nella categoria b.3.A.



Tale categoria può essere individuata grazie ad una semplice e rapida osservazione dell'edificio.

Nel caso specifico, a titolo esemplificativo, si delineano in modo più articolato le caratteristiche che la determinano.

In riferimento alla muratura esterna, essa è costituita da blocchi di tufo, tipica nelle costruzioni del periodo. Nella struttura muraria dell'Acquario i blocchi di tufo, dello spessore medio di 14-18 cm, sono grossolanamente sbozzati e disposti secondo ricorsi prevalentemente orizzontali; l'intera opera muraria è resa solidale attraverso l'uso della malta pozzolanica.

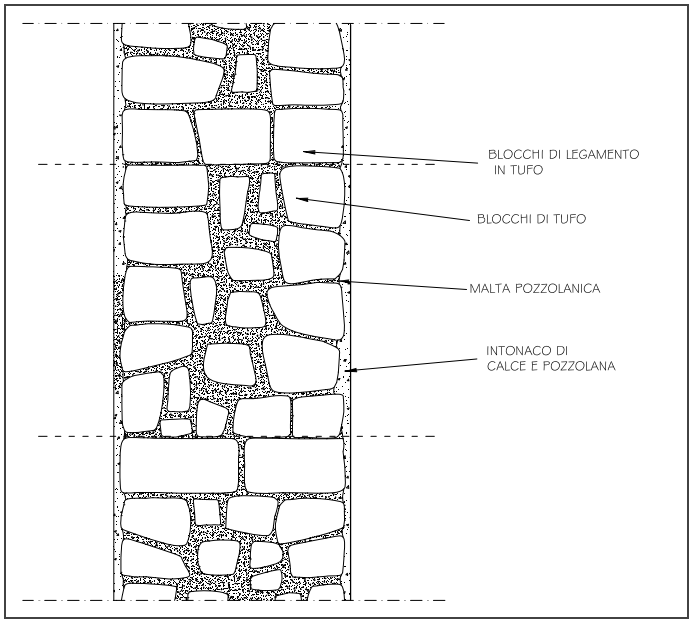


Fig.7. Sezione muraria

Analizzando nello specifico le caratteristiche della sezione muraria, questa presenta uno spessore medio di circa 75 cm, con una massa di 1870 kg/mq. In base a questi valori, si può stabilire che le prestazioni delle frontiere perimetrali dell'Acquario Romano rientrano nei limiti previsti dalla UNI EN ISO 13786: decremento pari a 0,03 e sfasamento pari a 19,41 ore, con una trasmittanza di 1,35 (W/m^2 K). Ciò dimostra la collocazione dell'Acquario Romano nella sottocategoria b. (muratura pesante).

In riferimento, invece, all'irraggiamento, l'elemento più caratterizzante risulta essere la copertura, realizzata completamente in vetro, che ricopre totalmente la sala centrale dell'edificio: questa favorisce un irraggiamento diretto, senza alcun tipo di schermatura, in corrispondenza dell'ambiente interno (sottocategoria 3).

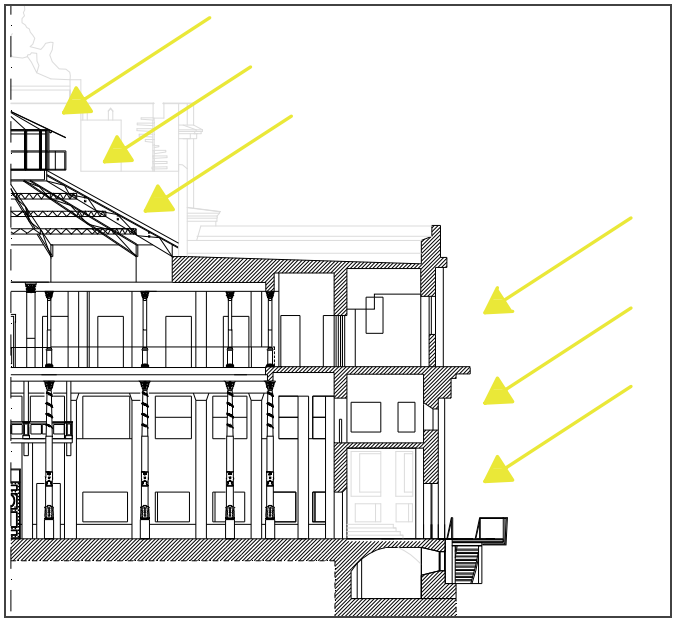


Figura 8. Disposizione delle superfici vetrate.

In ultima analisi si considera la ventilazione: questa avviene attraverso aperture posizionate lungo tutto il perimetro della struttura, su ciascuno dei tre livelli, che consentono l'attraversamento di flussi d'aria orizzontali (sottocategoria A).

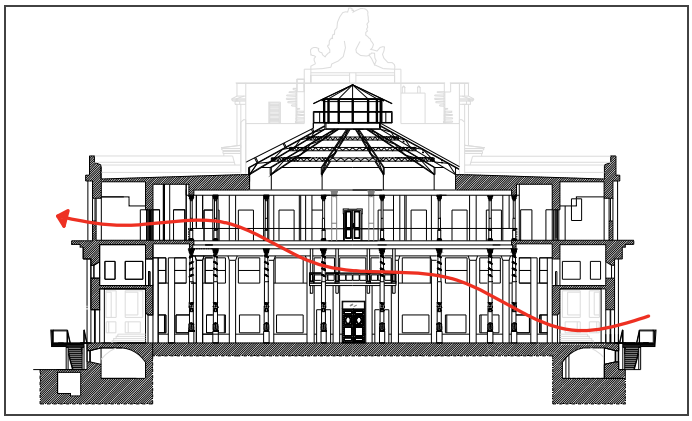


Figura 9. Rappresentazione ideogrammatica dei flussi d'aria

Ipotizzando, a mero scopo esemplificativo, di voler intervenire sull'Acquario Romano per un'ulteriore ristrutturazione e conseguente cambio di destinazione, e avendo come scopo quello di ridurre gli apporti termici estivi e aumentare i guadagni invernali, si può immaginare in prima approssimazione e sulla base dell'esperienza quanto segue:

- **sottocategoria b.** non è conveniente considerare interventi sulle murature, sia per le prestazioni che esse assicurano allo stato attuale (sebbene la trasmittanza non raggiunga i valori stabiliti dalle norme vigenti), sia ovviamente anche per ragioni architettoniche, storiche e culturali. L'unico intervento fattibile è quello sulle superfici vetrate delle finestre, per le quali sarebbe opportuno adottare dei vetri doppi basso-emissivi in luogo dei vetri singoli attualmente installati;
- **sottocategoria 3.** è possibile ipotizzare l'introduzione di schermature mobili in copertura e sulle finestrature in modo da ridurre l'irraggiamento estivo;

- **sottocategoria A.** le aperture laterali potrebbero essere concepite in modo da controllare la ventilazione naturale. È anche ipotizzabile un incremento della ventilazione naturale-passiva ricorrendo a condotti interrati o sfruttando il piano seminterrato e gli ambienti ipogei presenti nell'intorno.

Queste soluzioni in futuro potranno essere individuate all'interno di un "repertorio" di riferimento al quale si sta lavorando, ma che non ha ancora raggiunto un livello sufficiente di definizione.

Naturalmente ciò che viene immaginato in prima approssimazione deve poi essere approfondito e le soluzioni definitivamente adottate in sede progettuale potrebbero anche muoversi su linee parzialmente differenti, anche in funzione di considerazioni di carattere diverso (livello di confort che si intende raggiungere, budget economico a disposizione, introduzione dei sistemi impiantistici non termici, ecc.).

9. CONCLUSIONI.

Come mostrato nell'esempio precedentemente svolto la matrice viene impiegata per individuare con molta semplicità e rapidità le principali caratteristiche di funzionamento passivo dell'edificio e per delineare su tale base le prime ipotesi di intervento progettuale.

La matrice ha tuttavia un'utilità anche in rapporto alla scelta degli strumenti di simulazione, poiché i molti programmi ad oggi disponibili non forniscono risposte ugualmente affidabili in rapporto ai tre elementi individuati, essendo in genere più dedicati a specifici aspetti (l'involucro dell'edificio, la capacità termica volumica, la fluidodinamica, ecc.). Conseguentemente pare opportuno utilizzare i softwares in funzione dell'elemento o degli elementi di maggiore importanza a fini progettuali tra i tre (nel caso dell'esempio è rilevante l'aspetto fluidodinamico legato alla ventilazione e il controllo dell'irraggiamento) [13].

In effetti, tuttavia, queste conclusioni rappresentano solamente l'inizio del percorso del lavoro di ricerca che comprende due ulteriori fasi.

La prima di queste fasi consiste nella creazione di un repertorio di soluzioni progettuali correlate alle categorie qui individuate, in modo da poter disporre di uno strumento di uso immediato, ma completo e sistematico, per avanzare le ipotesi di lavoro che nell'esempio sono state indicate solamente sulla base dell'intuito e dell'esperienza. È possibile (ma non si è ancora presa una decisione in merito) che si aggiungano anche indicazioni circa i softwares utilizzabili.

L'ultima fase riguarda invece l'elaborazione della metodologia progettuale e realizzativa, la quale indicativamente si articolerà nei seguenti punti:

- Rilievo di base architettonico, impiantistico (ove siano presenti impianti) e delle condizioni di confort richieste.
- Analisi dello stato di fatto mediante simulazioni con il software più opportuno.
- Definizione progettuale degli interventi.
- Verifica del progetto mediante simulazioni con il software più opportuno.
- Realizzazione degli interventi.
- Verifica strumentale e monitoraggio dei risultati ottenuti.

Pertanto per una completa comprensione del lavoro si rimanda alle prossime memorie nelle quali saranno sviluppate le fasi sopra delineate.

10. RIFERIMENTI.

1. C. Balocco, F. Farneti, G. Minutoli, *I sistemi di ventilazione naturale negli edifici storici*, Alinea editrice, Firenze, 2009.
2. P. A. Cetica, *L'architettura dei muri intelligenti, esperienze di climatizzazione sostenibile nell'Ottocen*to, Angelo Pontecorboli, Firenze, 2004.
3. V. Calderaro, S. Agnoli, *Passive heating and cooling strategies in an approaches of retrofit in Rome*, Energy and buildings 39 (2007) 875-885.
4. F. M. Butera, *Dalla caverna alla casa ecologica*, Edizioni Ambiente, Milano, 2007.
5. S. M. A. Eben, *Adobe as a thermal regulating material*, Solar Wind Technology 7 (1990)407-416.
6. A. Chel, G. N. Tiwari, *Performance evaluation and life cycle cost analysis of earth to air heat exchanger integrated with adobe building for New Delhi composite climate*, Energy and Buildings 41 (2009) 56-66.
7. V. Ceradini, *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione degli insediamenti storici dell'Area Grecanica.,* Gangemi, Roma (ITA), 2004.
8. F. Giovanetti, *Codice di pratica di Città di Castello*, DEI ed. Roma, 1998.
9. C. Carocci, *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione dei Sassi di Matera,* La Bautta, Matera, 1997.
10. A. Giuffrè, *Sicurezza e Conservazione dei centri storici: Il caso Ortigia*, Laterza, 1993.
11. V. De Feo, *L'Acquario Romano - quaderni dell'assessorato per gli interventi del centro storico del comune di Roma*, Kappa, Roma 1983.
12. A. Berrino, A. Buccaro, F. Mangone, *Ettore Bernich architetto 1850-1914*, Prospettive Edizioni, Roma 2006.
13. M. Beccali, *Analisi energetica in regime dinamico*, Casaeclima 17 (2009) 38-43.

SESSIONE

EFFICIENZA E CERTIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

VALUTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI: CONFRONTO TRA CODICI DI CALCOLO STAZIONARI E DINAMICI

Francesco Asdrubali[1] , Giorgio Baldinelli[1], Francesco Bianchi[1] , Fabio Sciurpi[2], Cristina Carletti[2]

[1] CIRIAF, Unità operativa Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia,
[2] CIRIAF, Unità operativa TAED, Università degli Studi di Firenze

SOMMARIO

Il contenimento dei consumi energetici negli edifici rappresenta uno dei settori di intervento più significativi per il raggiungimento degli obiettivi imposti dal protocollo di Kyoto. La valutazione energetica degli edifici passa attraverso l'utilizzo di codici di calcolo dedicati, i cui risultati devono essere attentamente valutati e confrontati: la conoscenza di punti di forza e punti deboli dei differenti codici di calcolo presenti sul mercato risulta fondamentale per il loro utilizzo finalizzato ad una progettazione energeticamente consapevole.

Scopo della memoria è quello di presentare alcune simulazioni condotte con un codice di calcolo dinamico a confronto con alcuni dei software che sono stati certificati dal CTI in questi ultimi mesi; i codici lavorano tutti in regime stazionario ed in alcuni casi sono di tipo semplificato. È stato preso in esame un edificio campione – oggetto già di precedenti simulazioni – e se ne sono valutati i fabbisogni di energia primaria nella stagione estiva e nella stagione invernale in diverse località italiane (Milano, Firenze, Roma, Bari e Palermo).

1. INTRODUZIONE

Alla luce della Direttiva 2002/91/CE, recepita in Italia con l'emanazione del D.lgs. 192/2005 [1], successivamente modificato dal D.lgs. 311/06 [2], e delle recenti linee-guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici [3], appare strategico poter valutare le prestazioni di differenti codici di calcolo utilizzati per l'analisi delle prestazioni e del comportamento energetico degli edifici; la valutazione comparativa è operazione tutt'altro che banale, considerata la grande varietà di codici di calcolo disponibili a livello commerciale, che si differenziano per regimi di calcolo considerati, per algoritmi di calcolo impiegati, per tipologia di interfaccia grafica.

Al fine di valutare operativamente differenti codici di calcolo, si è definita una metodologia di analisi che consta delle seguenti fasi: (1) classificazione dei più diffusi codici di calcolo esistenti per la valutazione energetica degli edifici; (2) caratterizzazione dei principali codici di calcolo individuati e confronto tra le rispettive caratteristiche peculiari grazie alla redazione di una scheda di prodotto; (3) utilizzo dei codici di calcolo individuati per simulare il comportamento energetico di un edificio campione; (4) confronto ed analisi dei risultati delle simulazioni condotte.

La ricerca, avviata nell'estate del 2008, è stata articolata in diverse fasi; si sono innanzitutto valutati i fabbisogni energetici in regime invernale esaminando l'effetto dei ponti termici [4], si sono quindi valutati i fabbisogni energetici in regime invernale ed estivo operando un confronto tra codici di calcolo dinamici e stazionari ed esaminando il comportamento del sistema edificio con diverse stratigrafie [5]. Infine, in seguito all'emanazione delle linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici, e alla conseguente certificazione da parte del CTI di alcuni codici di calcolo commerciali, si sono ripetute le simulazioni per confrontare i risultati da essi forniti con quelli di un attendibile codice di calcolo che lavora in regime dinamico.

2. METODOLOGIE DI CALCOLO PROPOSTE DALLE LINEE GUIDA NAZIONALI PER LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

Il D.M. del 26/6/2009 "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici" riporta le diverse metodologie di riferimento che possono essere utilizzate per la determinazione della prestazione energetica degli edifici.

Tali metodologie si basano su precisi metodi di calcolo di riferimento nazionali, differenziati per edifici nuovi o esistenti, per tipologia di edificio, per dimensioni e complessità dello stesso (tabella 1) [8, 9].

In particolare, per gli edifici nuovi si fa riferimento al "metodo di calcolo di progetto" (paragrafo 5.1 dell'Allegato A del D. del 26/6/2009), che per il calcolo degli indici di prestazione energetica dell'edificio per la climatizzazione invernale (EP_i ed $EP_{i,invol}$) ed estiva ($EP_{e,invol}$) fa riferimento alla norme *UNI/TS 11300 – 1 e UNI/TS 11300 – 2* [6, 7]. Tale procedura è applicabile a tutte le tipologie di edifici indipendentemente dalla loro dimensione.

Per gli edifici esistenti si fa invece riferimento al "metodo di calcolo da rilievo sull'edificio" (paragrafo 5.2 dell'Allegato A del D.M. del 26/6/2009), che prevede per il calcolo degli indici di prestazione energetica dell'edificio per la climatizzazione invernale (EP_i ed $EP_{i,invol}$) ed estiva ($EP_{e,invol}$) i seguenti tre livelli di approfondimento, in funzione della tipologia e dimensione dell'edificio:

1) per tutte le tipologie edilizie, indipendentemente dalla loro dimensione, il riferimento nazionale sono le norme

tecniche *UNI/TS 11300 – 1* e *UNI/TS 11300 – 2* e le relative semplificazioni previste per gli edifici esistenti. Infatti le predette norme prevedono, per gli edifici esistenti, modalità di determinazione dei dati descrittivi dell'edificio e degli impianti non solo derivanti da indagini strumentali, svolte direttamente sull'edificio, ma anche per analogia costruttiva per mezzo di abachi e tabelle in relazione, ad esempio, alla tipologia e all'anno di costruzione.

Tabella 1: Utilizzo delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche in relazione agli edifici interessati e ai servizi energetici da valutare ai fini della certificazione energetica (Allegato 3 dell'Allegato A del D. del 26/6/2009).

	"Metodo di calcolo di progetto" (paragrafo 5.1)	"Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio" (paragrafo 5.2 punto 1)	"Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio" (paragrafo 5.2 punto 2)	"Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio" (paragrafo 5.2 punto 3)
Edifici interessati	Tutte le tipologie di edifici nuovi ed esistenti	Tutte le tipologie di edifici esistenti	Edifici residenziali esistenti con superficie utile inferiore o uguale a 3000 m2	Edifici residenziali esistenti con superficie utile inferiore o uguale a 1000 m2
Prestazione invernale involucro edilizio	Norme UNI/TS 11300	Norme UNI/TS 11300	DOCET (CNR-ENEA)	Metodo semplificato (Allegato 2)
Energia primaria prestazione invernale	Norme UNI/TS 11300	Norme UNI/TS 11300	DOCET (CNR-ENEA)	Metodo semplificato (Allegato 2)
Energia primaria prestazione acqua calda sanitaria	Norme UNI/TS 11300	Norme UNI/TS 11300	DOCET (CNR-ENEA)	Norme UNI/TS 11300 (esistenti)
Prestazione estiva involucro edilizio	Norme UNI/TS 11300	Norme UNI/TS 11300	DOCET (CNR-ENEA)	Norme UNI/TS 11300 o DOCET o metodologia paragrafo 6.2 (*)

2) per i soli edifici residenziali con superficie utile fino a 3000 m^2 si fa riferimento al metodo di calcolo DOCET, predisposto da CNR ed ENEA, sulla base delle norme tecniche *UNI/TS 11300 – 1* e *UNI/TS 11300 – 2*. Tale metodo risponde ai requisiti di semplificazione, finalizzati a minimizzare gli oneri a carico dei richiedenti.

3) per i soli edifici residenziali con superficie utile fino a 1000 m^2, per il calcolo degli indici di prestazione energetica dell'edificio per la climatizzazione invernale (EP_i ed $EP_{i,invol}$), si utilizza come riferimento il metodo semplificato di cui all'allegato 2 dell'Allegato A del D.M. del 26/6/2009. Per la valutazione qualitativa delle caratteristiche dell'involucro edilizio volte a contenere il fabbisogno per la climatizzazione estiva, in linea con i requisiti di semplificazione delle procedure, anziché calcolare l'$EP_{e,invol}$, si può fare riferimento alla determinazione di indicatori quali lo sfasamento (S - espresso in ore) ed il fattore di attenuazione (fa – adimensionale), calcolati secondo la norma tecnica UNI EN ISO 13786.

Sulla base dei valori assunti dal parametro EP_i, calcolato con una delle metodologie elencate, si definisce il sistema di classificazione nazionale riportato in figura 1, in funzione della destinazione d'uso, del rapporto di forma S/V e della zona climatica.

Sulla base dei valori assunti dal parametro $EP_{e,invol}$, calcolato con una delle metodologie elencate, si definisce il sistema di classificazione nazionale riportato in tabella 2, valido per tutte le destinazioni d'uso, indipendentemente dal rapporto di forma S/V e dalla zona climatica.

Classe A_i+ < 0,25 EPi_L (2010)

0,25 EPi_L (2010) ≤ **ClasseA_i < 0,50 EPi_L** (2010)

0,50 EPi_L (2010) ≤ **ClasseB_i < 0,75 EPi_L** (2010)

0,75 EPi_L (2010) ≤ **ClasseC_i < 1,00 EPi_L** (2010)

1,00 EPi_L (2010) ≤ **ClasseD_i < 1,25 EPi_L** (2010)

1,25 EPi_L (2010) ≤ **ClasseE_i < 1,75 EPi_L** (2010)

1,75 EPi_L (2010) ≤ **Classe F_i < 2,50EPi_L** (2010)

Classe G_i > 2,50 EPi_L (2010)

Figura 1: Scala di classi energetiche espressione della prestazione energetica per la climatizzazione invernale EP_i

Tabella 2: Scala di classi energetiche espressione della prestazione energetica per la climatizzazione estiva $EP_{e,invol}$

Epe, invol (kWh/m^2anno)	Prestazioni	Qualità prestazionale
Epe, invol < 10	Ottime	I
10 ≤ Epe, invol < 20	Buone	II
20 ≤ Epe, invol < 30	Medie	III
30 ≤ Epe, invol < 40	Sufficienti	IV
Epe, invol ≥ 40	Mediocri	V

Infine, per la sola metodologia semplificata di cui al punto 3 precedente, sulla base dei valori assunti dagli indicatori sfasamento e fattore di attenuazione si definisce la classificazione nazionale riportata in tabella 3, valida per tutte le destinazioni d'uso e tutte le zone climatiche.

Tabella 3: Scala della qualità prestazionale estiva dell'involucro edilizio attraverso i parametri sfasamento e fattore di attenuazione

Sfasamento (ore)	Attenuazione	Prestazioni	Qualità prestazionale
S ≥ 12	fa < 0,15	Ottime	I
12 ≥ S > 10	0,15 ≤ fa < 0,30	Buone	II
10 ≥ S > 8	0,30 ≤ fa < 0,40	Medie	III
8 ≥ S > 6	0,40 ≤ fa < 0,60	Sufficienti	IV
6 ≥ S	fa > 0,60	Mediocri	V

Nei casi in cui le coppie di parametri caratterizzanti l'edificio non rientrino coerentemente negli intervalli fissati in tabella, per la classificazione prevale il valore dello sfasamento.

3. SIMULAZIONI: IPOTESI DI CALCOLO

Per le simulazioni oggetto della presente memoria, si sono esaminati i seguenti codici di calcolo: MC4 Suite 2009, TerMus Versione 14.59, EC601 Versione 07.01.03; tutte le versioni citate hanno ottenuto la conformità da parte del CTI. Il confronto è stato completato con il codice di calcolo

semplificato DOCET, proposto dalle linee guida, e con un codice di calcolo dinamico (Trnsys) [10], preso come riferimento per confrontare i valori con uno strumento che approssima meglio il reale comportamento dell'edificio [11].

I tre software conformi alle normative vigenti implementano gli algoritmi di calcolo che impongono condizioni stazionarie sulla base di dati climatici normati. Il confronto è stato condotto su di un semplice edificio campione, scelto in modo da ridurre al minimo la complessità geometrica e fisica dell'involucro e stabilendo precise condizioni al contorno, in modo da limitare al massimo la personale interpretazione dei dati mancanti da parte di chi conduce la simulazione. Alla luce di queste considerazioni, tali condizioni al contorno sono state implementate ed uniformate nel corso della ricerca stessa sulla base delle singole informazioni richieste come input dai differenti codici di calcolo utilizzati, richiedendo pertanto diverse azioni di feed-back riferite alla metodologia di indagine. Le condizioni climatiche prescelte sono state quelle relative alle città di Milano, Firenze, Roma, Bari e Palermo.

L'edificio campione utilizzato nelle simulazioni è ad un piano fuori terra, con rapporto S/V pari a 0,749 m^{-1}, destinato a residenza, di dimensioni e caratteri distributivo funzionali riportati in sintesi nella figura 2. Le principali caratteristiche dell'involucro dell'edificio – che è stato oggetto anche di precedenti lavori [4, 5] - sono riportate in tabella 4.

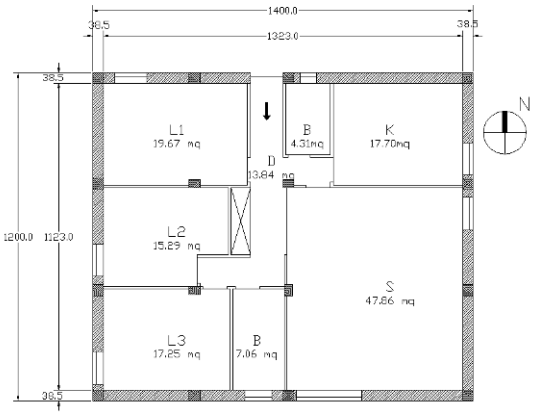
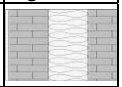
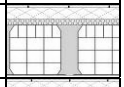
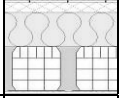


Figura 2: Pianta dell'edificio campione impiegato per le simulazioni.

Tabella 4: Caratteristiche dell'involucro dell'edificio campione (condizioni iniziali)

Simbolo	Definizione grandezza	Valore	Unità di misura	Schema grafico
U_1	Trasmittanza pareti perimetrali (struttura pesante con isolamento in intercapedine)	0,246	W/m^2K	
U_2	Trasmittanza solaio contro terra (senza vespaio)	0,378	W/m^2K	
U_3	Trasmittanza solaio copertura (solaio in laterocemento con isolamento dall'esterno)	0,204	W/m^2K	
U_g	Trasmittanza vetro (vetro camera basso emissivo $4^{e=0,2}$-16-4 con interposto Argon)	1,60	W/m^2K	
g_{ort}	Fattore solare ortogonale delle superfici vetrate	0,622	-	
U_f	Trasmittanza telaio (in PVC con taglio termico e tenuta al vento)	2,00	W/m^2K	
F_c	Fattore di ombreggiamento medio per schermature interne	non sono considerati gli schermi interni		

Le caratteristiche relative al sistema di climatizzazione associato all'edificio sono riportate in tabella 5.

Tabella 5: Caratteristiche dell'impianto di climatizzazione

Strategia di ventilazione	Impianto di ventilazione meccanica controllata	Assente			
	Ricambi d'aria naturali medi orari	0,3 vol/h			
Impianto di climatizzazione invernale	Generatore di calore	Caldaia standard a tiraggio forzato			
	Regime di funzionamento	Attenuato / continuo 7gg/7			
	Terminali di erogazione	Radiatori con superficie di emissione piana e continua - ηe = 0,96			
	Sistema di regolazione	Climatico + singolo ambiente (regolatore modulante – banda proporzionale 2°C) - ηr = 0,98			
	Rete di distribuzione	Edificio tipo C – UNI 10348 - ηd = 0,96			
	Potenza nominale generatore Pn Fase 1 e 3	Località	Pn	η_P	η_G
		Milano	6kW	0,92	0,83
		Roma	6kW	0,90	0,81
		Bari	6kW	0.90	0.81
		Palermo	6kW	0,87	0,79
		Firenze	6kW	0,91	0,82
	Potenza nominale generatore Pn Fase 2	Località	Pn	η_P	η_G
		Milano	10kW	0,93	0,84
		Roma	10kW	0,92	0,83
		Bari	10kW	0.92	0.83
		Palermo	10kW	0,91	0,82
		Firenze	10kW	0,92	0,83
Acqua calda sanitaria (ACS)	Impianto per la produzione di ACS	Non considerato			
Fonti di energia rinnovabile	Solare termico, solare fotovoltaico, sistemi solari passivi	Assenti			

L'edificio, per le sue caratteristiche geometriche e d'uso, è adatto a soddisfare tutti i requisiti necessari per utilizzare le metodologie di calcolo presentate nel paragrafo 2.

Le simulazioni sono state condotte con riferimento sia al periodo invernale che a quello estivo senza ponti termici, ottenendo risultati relativi al fabbisogno invernale specifico dell'involucro ($EP_{i,invol}$), al fabbisogno invernale di energia primaria (EP_i) ed infine al fabbisogno estivo specifico dell'involucro ($EP_{e,invol}$).

4. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NEL PERIODO INVERNALE

I risultati delle simulazioni per la stagione invernale sono riportati in tabella 6. In essa si riportano anche i valori ottenuti dal calcolo proposto nell'allegato 2 delle linee guida. Gli indicatori prestazionali presi a riferimento sono il fabbisogno invernale specifico dell'involucro, $EP_{i,invol}$ ed il fabbisogno invernale di energia primaria EP_i entrambi espressi in kWh/m^2a. Viene riportata per i software certificati la classe energetica in cui viene collocato l'edificio, sulla base del rapporto S/V calcolato dallo stesso software.

Tabella 6: Risultati delle simulazioni nel periodo invernale divisi per software e località climatica.

Termus	**$EP_{i,invol}$**	**EP_i**	**Classe energetica**
Milano	40,9	49,1	A
Firenze	26,3	32,0	A
Roma	16,0	19,7	A+
Bari	12,2	15,0	A+
Palermo	5,5	7,0	A+
EC601			
Milano	44,3	53,0	B
Firenze	31,5	37,8	B
Roma	19,0	23,2	A
Bari	14,9	18,1	A
Palermo	7,5	9,4	A
MC4[1]			
Milano	34,5	41,2	A
Firenze	21,0	25,3	A+

Roma	13,8	16,8	A+
Bari	8,8	10,7	A+
Palermo	3,3	4,2	A+
DOCET[1]			
Milano	59,6	77,7	C
Firenze	43,3	57,8	B
Roma	29,5	40,8	B
Bari	23,6	32,2	B
Palermo	12,7	18,8	A
Trnsys[2]			
Milano	37,7	-	-
Firenze	23,9	-	-
Roma	16,3	-	-
Bari	12,9	-	-
Palermo	2,9	-	-
Allegato 2[3]			
Milano	49,9	59,4	B
Firenze	32,3	38,5	B
Roma	18,3	21,8	A
Bari	12,3	14,6	A
Palermo	3,9	4,7	A

[1] Per il calcolo dell' EP_i il programma non permette di variare tutti i rendimenti dell'impianto utilizzando valori assegnati
[2] Il codice di calcolo Trnsys non calcola l'EP_i
[3] È stato ritenuto opportuno inserire i valori dei rendimenti dell'impianto in base a quanto suggerito dall'allegato 2.

L'edificio risulta essere collocato nelle classi energetiche più alte da tutti i programmi.

Si riportano di seguito i grafici dei due valori prestazionali del periodo invernale relativi ai software analizzati (Figure 3 e 4). Per ogni software sono stati raggruppati i risultati relativi alle diverse località climatiche evidenziando, nella parte destra del grafico, i risultati del codice di calcolo Trnsys (per il solo $E_{pi,invol}$), che si differenzia dagli altri codici per algoritmi di calcolo e dati climatici, rappresentando la simulazione più vicina al reale comportamento dell'edificio. Appare interessante il risultato di MC4, che si avvicina molto a Trnsys e che presenta, soprattutto in zone climatiche con minor irraggiamento, valori di $EP_{i,invol}$ inferiori a tutti i codici di calcolo. Diverso invece è il caso di DOCET che sovrastima il fabbisogno di energia in tutte le località climatiche con valori molto superiori all'andamento di tutti gli altri software.

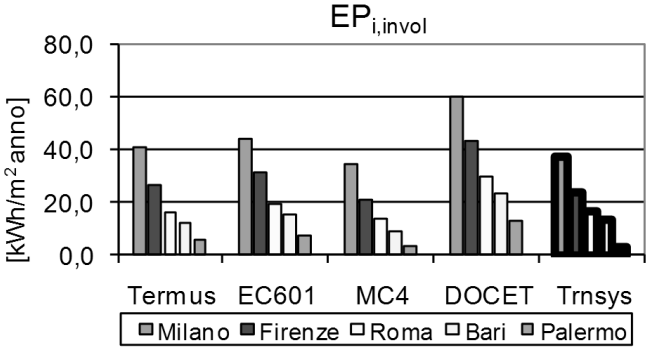


Figura 3: Confronto dell'indice di prestazione energetica per il riscaldamento dell'involucro edilizio $EP_{i,invol}$ (kWh/m^{2}a) calcolato dai differenti codici di calcolo nelle diverse località

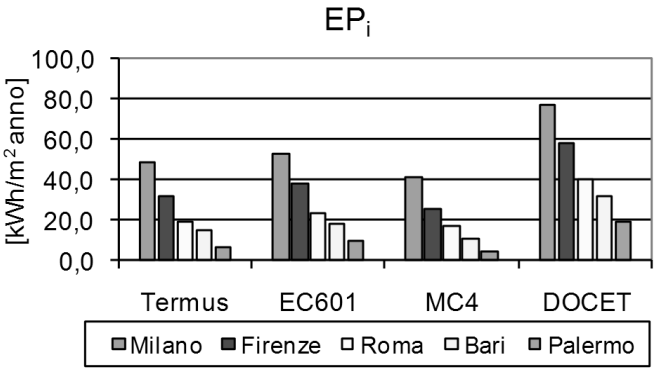


Figura 4: Confronto dell'indice di prestazione energetica per l'energia primaria di riscaldamento EP_i (kWh/m^{2}a) calcolato dai differenti codici di calcolo nelle diverse località

5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NEL PERIODO ESTIVO

Per il periodo estivo è stato preso come indicatore prestazionale il fabbisogno specifico dell'involucro per il raffrescamento, $EP_{e,invol}$ espresso in kWh/m^{2}a. La durata del periodo di raffrescamento è stata desunta dai tre software conformi alle normative e non sembra presentare particolari differenze (tabella 7).

Tabella 7: Periodi di raffrescamento adottati dai diversi software

	Termus	**EC601**	**MC4**
Milano	23/04 – 01/10	20/04 – 01/10	16/04 – 14/10
Firenze	22/04 – 10/10	26/04 – 07/10	16/04 – 31/10
Roma	16/04 – 22/10	13/04 – 27/10	16/04 – 31/10
Bari	13/04 – 29/10	12/04 – 27/10	01/04 – 14/11
Palermo	02/04 – 10/11	03/04 – 08/11	01/04 – 30/11

I risultati delle simulazioni sono riportati in tabella 8, insieme alle classi prestazionali per la climatizzazione estiva attribuite all'edificio da ogni software.

Inoltre è riportato il risultato ottenuto con il metodo di calcolo proposto dalle linee guida per edifici esistenti residenziali con superficie utile minore o uguale a 1000 m^2, che tiene conto delle sole prestazioni del pacchetto murario in termini di attenuazione e sfasamento (tabella 9). Esso non dipende dalle condizioni climatiche poiché si ha a che fare con proprietà intrinseche della struttura.

Tabella 8: Risultati delle simulazioni nel periodo estivo divisi per software e località climatica.

Termus	**$EP_{e,invol}$**	**Classi prestazionali**
Milano	32,5	IV
Firenze	36,1	IV
Roma	43,5	V
Bari	44,6	V
Palermo	49,4	V
EC601		
Milano	33,6	IV
Firenze	31,7	IV
Roma	42,0	V

Bari	41,2	V
Palermo	45,6	V
MC4		
Milano	35,8	IV
Firenze	39,2	IV
Roma	43,1	V
Bari	47,2	V
Palermo	52,8	V
DOCET		
Milano	20,1	III
Firenze	23,0	III
Roma	28,2	III
Bari	26,9	III
Palermo	31,4	IV
Trnsys		
Milano	11,3	-
Firenze	18,1	-
Roma	21,3	-
Bari	22,2	-
Palermo	33,5	-

Tabella 9: Prestazioni del pacchetto murario in termini di attenuazione e sfasamento

	Sfasamento	**Attenuazione**	**Prestazioni**	**Qualità prestazionale**
Parete verticale	11,20	0,29	Buone	II
Copertura	14,03	0,12	Ottime	I

Analizzando le classi prestazionali relative all'edificio nel periodo estivo si riscontra un'inversione di tendenza: mentre nel periodo invernale DOCET sovrastimava $EP_{i,invol}$ ed erano gli altri tre codici di calcolo ad avvicinarsi di più ai risultati forniti da Trnsys, nel caso estivo si ha un certo allineamento tra Termus, EC601 e MC4 su valori elevati di $EP_{e,invol}$, mentre stavolta è DOCET ad essere in linea con il codice dinamico Trnsys (figura 5).

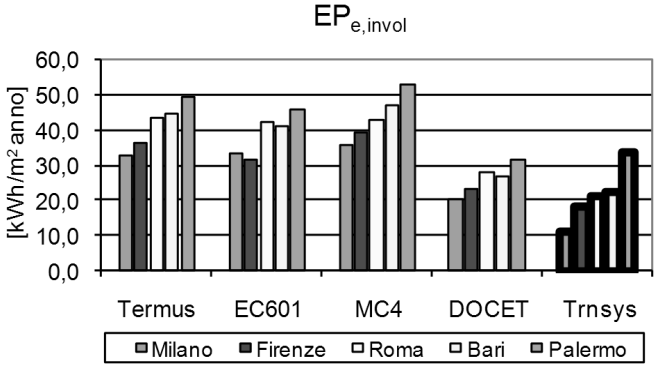


Figura 5: Confronto dell'indice di prestazione energetica per il raffrescamento dell'involucro edilizio $EP_{e,invol}$ (kWh/m^{2}a) calcolato dai differenti codici di calcolo nelle diverse località

6. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI SU BASE ANNUALE

Alla luce delle differenze relative tra i software nei risultati ottenuti in regime invernale ed estivo, si è ritenuto opportuno effettuare il confronto tenendo conto di entrambi i periodi, definendo così un fabbisogno specifico dell'involucro su base annuale ($EP_{tot,invol}$) espresso in kWh/m^{2}anno. Le differenze riscontrate tra i quattro programmi conformi alle normative tecniche UNI/TS 11300 si assottigliano nella definizione di questo parametro, come si evince dalla figura 6. Tenendo presente ancora Trnsys come riferimento del comportamento reale, gli altri codici di calcolo evidenziano comportamenti del tutto confrontabili tra loro, per effetto di una compensazione tra i valori estivi e quelli invernali; tutti i codici sovrastimano il valore di $EP_{tot,invol}$ rispetto a Trnsys.

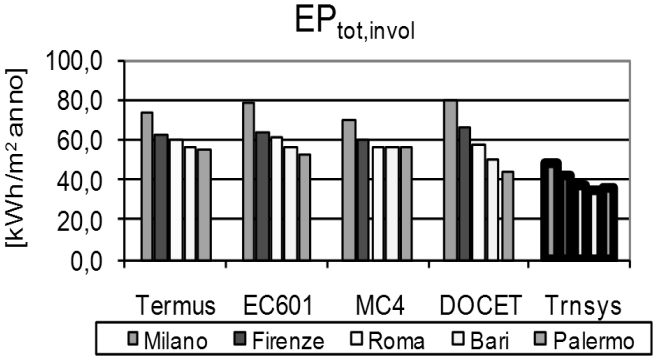


Figura 6: Confronto dell'indice di prestazione energetica per il fabbisogno energetico annuale dell'involucro edilizio $EPt_{ot,invol}$ (kWh/m^{2}a) calcolato dai differenti codici di calcolo nelle diverse località

CONCLUSIONI

La recente normativa nazionale e comunitaria sul rendimento energetico in edilizia prevede la definizione di metodi per la certificazione energetica che minimizzino gli oneri per gli utenti, al fine di promuovere la cultura della certificazione energetica. In tale contesto, appare strategico il ruolo dei codici di calcolo per la valutazione energetica degli edifici, che debbono essere auspicabilmente semplici ed al tempo stesso affidabili.

La ricerca, avviata nel 2008, si è posta l'obiettivo di confrontare i risultati ottenibili con alcuni dei principali codici di calcolo reperibili sul mercato che analizzano l'edificio sia in regime stazionario che dinamico, adottando procedure semplificate oppure complesse.

Nel presente lavoro sono illustrati i risultati ottenuti con codici di calcolo di tipo stazionario, conformi alle recenti linee-guida nazionali per la certificazione energetica (TERMUS, EC601, MC4 e DOCET), con un codice di calcolo dinamico (Trnsys).

Il confronto è stato condotto riferendosi al medesimo edificio campione, scelto in modo da ridurre al minimo la complessità geometrica e fisica dell'involucro, cui sono state associate diverse stratigrafie di involucro. Le condizioni climatiche prescelte sono quelle relative alle città di Milano, Firenze, Roma, Bari e Palermo.

L'analisi è stata attuata valutando il fabbisogno termico dell'edificio con precise condizioni al contorno assegnate, sia nella stagione invernale che in quella estiva; i risultati mostrano scostamenti apprezzabili tra i diversi codici di calcolo conformi, se ci si riferisce alla sola stagione invernale o a quella estiva, ma una sostanziale convergenza degli stessi

per ciò che concerne le valutazioni su base annua. Sempre su base annua, i codici stazionari sovrastimano i fabbisogni energetici dell'edifico campione rispetto al codice dinamico.

BIBLIOGRAFIA

1. D.Lgs 19 agosto 2005, n. 192 "Attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia"
2. D. Lgs. 29 dicembre 2006, n. 311 "Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia"
3. D.M. 26 giugno 2009 "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici"
4. F. Sciurpi, C. Carletti, F. Asdrubali, G. Baldinelli, "Analisi e confronto di codici di calcolo esistenti per la valutazione energetica degli edifici, Convegno AICARR "Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto", Bologna-Torino-Napoli 2008-2009
5. F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. Bianchi, F. Sciurpi, C. Carletti: "Confronto tra codici di calcolo dinamici e stazionari per la valutazione energetica degli edifici", 47° Congresso Internazionale AICARR, Tivoli 8-9 ottobre 2009.
6. UNI/TS 11300-1. 2008 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
7. UNI/TS 11300 – 2 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria
8. V. Corrado, I. Ballarini: "La nuova normativa tecnica nazionale ed europea quale risposta ai requisiti di accuratezza, semplicità, riproducibilità e trasparenza nelle procedure di certificazione energetica", Convegno AICARR "Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto", Bologna-Torino-Napoli 2008-2009
9. P. Mazzei, L. Bellia, F. Ascione: "Le metodologie di calcolo degli indici di prestazione enrgetica degli edifici", Convegno AICARR "Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto", Bologna-Torino-Napoli 2008-2009
10. Manuale d'uso Trnsys versione 16
11. S.Ferrari, M. Baldinazzo: "Valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici: dalle norme semplificate all'analisi dinamica", Convegno AICARR "Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto", Bologna-Torino-Napoli 2008-2009

UNI TS 11300 PARTE 1 – APPLICAZIONE A CASI SEMPLICI DI EDILIZIA RESIDENZIALE: CONSIDERAZIONI SULLE MODALITÀ DI CALCOLO E PROPOSTE PER UNA MAGGIORE COMPRENSIONE DI ALCUNI ASPETTI

Anna Magrini, Lucia Cattani, Lorenza Magnani

Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale, Università degli Studi di Pavia,
Via Ferrata 1, 27100 Pavia – magrini@unipv.it

SOMMARIO

Si analizzano alcuni aspetti relativi all'applicazione delle procedure contenute nella norma UNI TS 11300 parte 1. La norma rappresenta la guida nazionale per l'applicazione delle indicazioni contenute nella Direttiva Europea 91/2002/CE; la parte 1 riguarda la determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale: la sua interpretazione tuttavia lascia talvolta dubbi sulla corretta esecuzione dei calcoli. Alcune precisazioni potrebbero migliorarne la comprensione. Inoltre le possibilità offerte dalle alternative di calcolo potrebbero portare a differenze anche consistenti nei risultati. Su questi aspetti si presentano alcune riflessioni e si propongono alcune interpretazioni relative ad un approccio più lineare per una maggiore definizione del problema che in alcuni casi consentirebbe di realizzare un buon compromesso tra l'affidabilità dei risultati e la semplicità e rapidità di esecuzione dei calcoli. Per esempio, talvolta, procedure semplificate potrebbero condurre a differenze con i risultati del calcolo dettagliato non particolarmente significative. Quest'analisi costituisce un primo esame delle problematiche messe in evidenza. Per convalidare queste considerazioni, tuttavia, occorrerà una più approfondita indagine su una ampia casistica.

Le indagini sono state sviluppate sulla base di casi studio rappresentativi di edifici residenziali, e riguardano alcuni aspetti relativi in particolare alla valutazione dell'extraflusso verso la volta celeste, all'ombreggiatura sulle superfici degli edifici, ai componenti vetrati, alle valutazioni riferite a superficie lorda o netta, alla ventilazione naturale.

INTRODUZIONE

La norma UNI TS 11300 [1, 2] rappresenta il riferimento nazionale per la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici. Il D.Lgs 115 (Marzo 2008) aveva fra gli obiettivi quello di sopperire all'assenza dei decreti attuativi al D.Lgs 192, prescrivendo l'obbligo di riferirsi alla Norma UNI TS 11300 Parti 1 e 2 per il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici. Successivamente, si trova nell'art.3 del D.P.R. n.59-2009 [3] il riferimento alle norme tecniche nazionali della serie UNI TS 11300 per le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici (indicando le parti 1 e 2 come disponibili). Inoltre nell'Allegato A del DM 26.06.2009 (Linee guida per la certificazione energetica) [4] si riconferma la necessità di tali norme come riferimento per i calcoli relativi alle procedure di certificazione energetica, facendo riferimento a quelle disponibili alla data di emanazione del Decreto e indicando anche le loro successive modificazioni e integrazioni.

L'importanza di tale norma risulta pertanto evidente nel contesto normativo nazionale. Sulla base del pacchetto di norme preparato a livello europeo a supporto della EPBD (Direttiva 2002/91/CE), la UNI TS 11300, nelle sue 4 parti, indica le condizioni e i dati che le norme europee hanno lasciato da definire a livello nazionale, fornendo inoltre una traccia più chiaramente delineata per lo sviluppo dei calcoli.

Nella prima parte della UNI TS 11300 viene descritto il metodo per il calcolo delle dispersioni dell'involucro edilizio, mentre nella seconda viene fornita la procedura per la determinazione dei rendimenti degli impianti di riscaldamento di tipo tradizionale e quindi la metodologia per ricavare il consumo di energia primaria del sistema edificio-impianto. La terza parte riguarda la determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva e l'ultima l'utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per il riscaldamento di ambienti e la preparazione di acqua calda sanitaria.

Da un'analisi dell'applicazione delle prime due parti sono state riscontrate alcune incertezze d'interpretazione che potrebbero portare a una non univoca applicazione della norma stessa. Ci si propone pertanto di evidenziare alcuni punti che possono destare perplessità e in qualche caso si analizza la possibilità di un'interpretazione, ragionata anche sulla base di esempi di calcolo.

1. EXTRAFLUSSO VERSO LA VOLTA CELESTE

Nella norma UNI EN ISO 13790 [5] il flusso di calore disperso verso la volta celeste da parte di superfici d'involucro che separano l'ambiente riscaldato dall'esterno è considerato come un guadagno "mancato" che viene conteggiato nel bilancio con segno negativo. La norma UNI TS 11300-1 invece considera tale grandezza come una perdita d'energia da parte dell'involucro. Non riporta indicazioni per il calcolo di questo contributo, in relazione agli ambienti non riscaldati limitrofi alla zona a temperatura controllata.

Infatti, dal momento che nella stessa norma si assume che i guadagni solari debbano essere valutati anche per tali tipi d'ambiente, sembrerebbe ragionevole, per coerenza, conteggiare anche gli extraflussi eventualmente dispersi dalle zone non riscaldate.

Alla luce di questa considerazione ci si pone il problema di come calcolare tali dispersioni. Per risolverlo, vengono qui considerati e discussi due approcci diversi. Il primo, in aderenza con le indicazioni della norma UNI EN ISO 13790,

conteggia gli extraflussi scorporandoli direttamente dai guadagni solari. Il secondo, coerentemente con la UNI TS 11300-1, tiene conto delle dispersioni verso la volta celeste, dovute agli ambienti non riscaldati, direttamente nello scambio termico per trasmissione Q_{tr}.

Per poter valutare il contributo secondo i due metodi, sono stati elaborati alcuni calcoli su un caso di riferimento rappresentato da un ambiente riscaldato di 130 m^2 di superficie calpestabile, confinante con un sottotetto chiuso all'aria non climatizzato. La superficie lorda del tetto, orizzontale, sovrastante il solaio è di 150 m^2. La trasmittanza della copertura è piuttosto elevata, pari a 3.01 W/(m^2 K).

Per semplicità in questo caso il sottotetto è stato considerato costituito da superfici orizzontali e verticali; le considerazioni esposte in questo paragrafo possono comunque essere estese anche al caso in cui siano presenti superfici oblique, tenendo conto dell'opportuno fattore di forma tra involucro edilizio e volta celeste.

Il sottotetto è delimitato da pareti verticali con trasmittanza pari a 0.48 W/(m^2 K): le superfici lorde disperdenti (emissività ε = 0.9) sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1.Estensione delle superfici opache del sottotetto

Pareti sottotetto	**Superficie (in m^2) esposta verso la volta celeste**			
	Nord	Sud	Ovest	Est
$\mathbf{A_c}$	15.00	15.00	10.00	10.00

In Figura 1 è rappresentato schematicamente un prospetto del sottotetto e dell'abitazione.

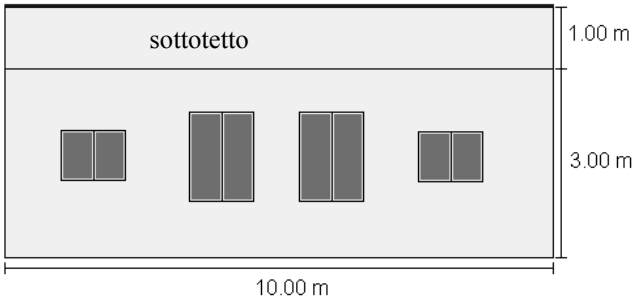


Figura 1. Prospetto Est dell'appartamento e del sottotetto

I calcoli comparativi sulla base dei due approcci sono stati condotti per il mese di gennaio considerando il clima di tre importanti città, Milano, Roma e Catania, caratterizzate da temperature giornaliere esterne medie mensili differenti e soprattutto da diversi valori dell'irraggiamento (Tabella 2).

Tabella 2. Temperature giornaliere esterne medie mensili ed irraggiamento per le diverse orientazioni (mese di Gennaio)

	T	**Nord**	**Sud**	**Ovest**	**Est**	**Orizzontale**
	[°C]	[MJ/(m^2 giorno)]				
Milano	1.7	1.5	6	2.9	2.9	3.8
Roma	7.6	2.1	10.6	5	5	6.3
Catania	10.7	2.6	14.5	6.9	6.9	9

Il primo approccio per il calcolo dell'extraflusso ha considerato la decurtazione dal guadagno solare delle strutture opache per la parte re-irraggiata verso la volta celeste. Il sottotetto isolato riceve un flusso derivante dal sole calcolabile con l'Eq. (1) e (2) (eq. 11 e 12 UNI TS 11300-1):

$$\Phi_{sol} = (1 - b_{tr})\Phi_{sol,u} \quad (1)$$

$$\Phi_{sol,u} = F_{sh,ob,k} A_{sol,k} I_{sol,k} \quad (2)$$

ove b_{tr} è pari a 0.7 (Prospetto 5 , UNI TS 11300-1), mentre il fattore di ombreggiamento, $F_{sh,ob,k}$ è pari a 1, dato che non vi sono né aggetti né ostruzioni insistenti sugli elementi componenti il sottotetto.

In questo primo caso si ipotizza che parte del flusso solare ricevuto dal locale non riscaldato ($\Phi_{sol,u}$) venga disperso verso la volta celeste secondo l'Eq. (3):

$$\Phi_{sol,u} = F_{sh,ob,k} A_{sol,k} I_{sol,k} - F_{r,k}\Phi_{r,k} \quad (3)$$

ove il coefficiente $F_{r,k}$, fattore di forma tra involucro edilizio e la volta celeste, assume valore pari a 1 per elementi orizzontali (chiusura superiore) e 0.5 per elementi verticali (muri) in caso d'assenza d'aggetti.

Ricordando anche l'Eq. (4) (eq. 46 UNI EN ISO 13790, par.11.4 UNI EN ISO 11300-1):

$$\Phi_{r,k} = R_{se} U_c A_c h_r \Delta\theta_{er} \quad (4)$$

si può determinare da un lato il guadagno solare dovuto alle strutture opache del sottotetto, dall'altro la dispersione delle stesse verso la volta celeste. La somma algebrica dei due contributi, moltiplicata per il fattore di riduzione b_{tr} fornisce, infine, l'ammontare dell'effettivo guadagno solare che viene trasmesso all'ambiente riscaldato dal sottotetto, espresso con l'Eq. (1). Per il sottotetto in questione i parametri necessari per il calcolo del flusso secondo l'Eq. (4) sono:

R_{se} = 0.04 (m^2 K)/W
$U_{c\ Pareti}$ = 0.48 W/(m^2 K)
$U_{c\ falde}$ = 3.01 W/(m^2 K)
h_r = 5 ε
$\Delta\theta_{er}$ = 11 K.

Nella tabella sottostante viene riportato il calcolo dell'apporto solare "corretto" effettuato per il sottotetto relativo ai climi delle tre città prima menzionate.

Come si può notare dai risultati riportati in Tabella 3, l'influenza dell'extraflusso non è trascurabile, dato che in vari casi l'energia emessa verso la volta celeste supera il guadagno solare. Ovviamente l'extraflusso rimane costante per le tre città considerate non essendo influenzato dal clima.

I valori riportati fanno anche notare l'entità e l'importanza di tale contributo per superfici verticali e orizzontali. Il secondo approccio, come già accennato, è stato formulato in modo più aderente all'impostazione della UNI TS 11300-1. Infatti l'extraflusso riferito al sottotetto può essere considerato come una dispersione di calore da sommare a quella imputabile alla trasmissione degli elementi d'involucro dell'ambiente riscaldato e delle eventuali zone non riscaldate ad esso adiacenti secondo l'Eq. (5) (eq. 3 UNI TS 11300-1).

$$Q_{tr} = H_{tr,adj}(\theta_{\mathrm{int},set} - \theta_e)t + \left(\sum_k F_{r,k}\Phi_{r,k}\right)t \quad (5)$$

Ragionando in analogia a quanto impostato nella norma in

relazione al guadagno solare, si potrebbe considerare la stessa riduzione del contributo anche per l'extraflusso, pertanto tale fattore è stato posto uguale a quello considerato dalla UNI TS 11300-1 per il guadagno solare di ambienti non riscaldati, vale a dire 1-b_{tr}.

Tabella 3. Approccio 1 - Apporto solare "corretto" per Milano, Roma e Catania.

	Muri				Chiusura
	Nord	**Sud**	**Ovest**	**Est**	**Orizzontale**
	Milano				
Apporti solari [MJ/mese]	4.00	16.00	5.21	5.21	1276.95
Extraflusso [MJ/mese]	19.10	19.10	12.72	12.72	752.34
Differenza [MJ/mese]	–15.10	–3.10	–7.51	–7.51	524.61
1-b_{tr}	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Apporto solare "corretto" **[MJ/mese]**	–4.53	–0.93	–2.25	–2.25	157.38
	Roma				
Apporti solari [MJ/mese]	5.61	28.27	8.99	8.99	2117.05
Extraflusso [MJ/mese]	19.10	19.10	12.72	12.72	752.34
Differenza [MJ/mese]	–13.49	9.17	–3.73	–3.73	1364.71
1-b_{tr}	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Apporto solare "corretto" **[MJ/mese]**	–4.05	2.75	–1.12	–1.12	409.41
	Catania				
Apporti solari [MJ/mese]	6.94	38.66	12.40	12.40	3024.36
Extraflusso [MJ/mese]	19.10	19.10	12.72	12.72	752.34
Differenza [MJ/mese]	–12.16	19.56	–0.32	–0.32	2272.02
1-b_{tr}	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Apporto solare "corretto" **[MJ/mese]**	–3.65	5.87	–0.10	–0.10	681.61

Seguendo il secondo approccio e considerando, quindi, la riduzione della dispersione, la determinazione dell'extraflusso può essere fatta secondo l'Eq. (6):

$$\Phi_{r,k} = (1 - b_{tr}) R_{se} U_c A_c h_r \Delta\theta_{er} \quad (6)$$

Nella tabella seguente viene riportato il calcolo dell'extraflusso secondo tale approccio e viene riportata anche l'incidenza sull'energia dispersa per trasmissione.

Tabella 4. Incidenza dell'extraflusso calcolato con l'approccio 2.

Approccio 2	Q_{tr}	**Extraflusso**	**Incidenza**
	[MJ/mese]	[MJ/mese]	%
Milano	19298.791	244.791	1.3%
Roma	13254.311	244.791	1.8%
Catania	10078.401	244.791	2.4%

Considerando i risultati sopra riportati ci si avvede che il secondo approccio comporta un'incidenza dell'extraflusso sull'energia trasmessa Q_{tr}, molto contenuta, inferiore, anche per il clima più caldo, al 3%.

Volendo operare un confronto tra il primo e il secondo metodo, più aderente alla UNI TS 11300-1, si può considerare, sempre per lo stesso sottotetto e per lo stesso mese, la Tabella 5 che mette in evidenza l'incidenza dell'extraflusso sull'energia dispersa per trasmissione. In questo caso l'extraflusso va considerato come un mancato guadagno solare, pertanto il contributo di tale termine è stato ottenuto a partire dai valori di Tabella 3 moltiplicati per il fattore di utilizzazione $\eta_{H,gn}$.

A rigore il contributo dell'energia emessa verso la volta celeste non andrebbe direttamente conteggiato nel fattore Q_{tr}, bensì nel computo finale dell'energia dispersa dall'involucro edilizio secondo l'Eq (7) (eq. 2 UNI TS 11300-1):

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn}(Q_{\text{int}} + Q_{sol}) \quad (7)$$

Tuttavia a livello matematico nulla cambia nello spostare un addendo e la somma proposta favorisce, appunto, il confronto tra i due metodi qui presentati.

Tabella 5. Incidenza dell'extraflusso calcolato con l'approccio 1

Approccio 1	Q_{tr}	**Extraflusso**	$\eta_{H,gn}$	**Incidenza**
	[MJ/mese]	[MJ/mese]	[-]	%
Milano	19295.86	241.86	0.999	1.3%
Roma	13251.38	241.86	0.991	1.8%
Catania	10075.47	241.86	0.968	2.4%

Confrontando i dati riportati in Tabella 5 con quelli in Tabella 4. Si nota che l'approccio 2 dà dei risultati molto simili a quelli ottenibili col metodo 1. Ricordando che quest'ultimo rispecchia il modus operandi europeo potrebbe essere ragionevole adottare, anche a livello nazionale, l'approccio 2. Infatti questo metodo consente, da un lato, di seguire la filosofia adottata nella UNI TS 11300, vale a dire di considerare l'extraflusso come una perdita d'energia per trasmissione, anziché di un mancato guadagno, dall'altro di ottenere risultati pressoché identici a quelli previsti nella norma UNI EN ISO 13790.

2. OMBREGGIATURA DI ELEMENTI OPACHI E VETRATI

La presenza di aggetti, o di ostruzioni esterne, insistenti su componenti opachi e vetrati di un edificio comporta una diminuzione dei guadagni solari. La norma UNI TS 11300-1 tiene conto di tale fenomeno tramite il coefficiente di riduzione per ombreggiatura $F_{sh,ob}$ che può essere determinato tramite l'Eq. (8):

$$F_{sh,ob} = F_{hor} F_{ov} F_{fin} \quad (8)$$

Il coefficiente di riduzione per ombreggiatura è il prodotto di tre fattori che tengono rispettivamente conto dell'influenza di ostruzioni, aggetti orizzontali ed aggetti verticali. Il valore di questi dipende sia dalle peculiarità climatiche e geografiche della zona ove sorge l'edificio, sia dall'orientamento e dalle caratteristiche geometriche degli elementi interessati da ombreggiatura. Le caratteristiche geometriche vengono

tradotte in un parametro angolare che si calcola come arcotangente del rapporto tra la profondità e la distanza degli aggetti, o delle ostruzioni, dai componenti dell'involucro edilizio sui quali insistono. Una volta noti gli angoli è possibile, sapendo la latitudine del sito, l'orientazione degli elementi dell'involucro edilizio ed il periodo dell'anno, ricavare i valori dei tre coefficienti. Per determinare gli angoli in questione, la norma UNI TS 11300-1 fornisce alcuni disegni (Par. 14.4 figure 6 e 7), peraltro tratti dalla UNI EN ISO 13790:2008, che però non chiariscono in maniera inequivocabile come determinare le grandezze geometriche necessarie. Tali schemi, peraltro, si riferiscono solo ai componenti vetrati e non forniscono precisazioni riguardo ai componenti opachi. Inoltre non viene chiarito come comportarsi in caso di presenza di più ostruzioni o aggetti dello stesso tipo.

Per ovviare alle ambiguità che possono sorgere dall'interpretazione delle due norme suddette si potrebbe procedere nel seguente modo ed effettuare il calcolo degli angoli caratterizzanti le ombreggiature operando come segue:

componenti vetrati

- considerare la superficie esterna degli elementi comprensiva del telaio;
- trovare il baricentro di tale superficie e da esso determinare la distanza (*d*) e la profondità (*h*) dell'aggetto, fermandosi all'intradosso dell'aggetto stesso;
- analogamente calcolare l'angolo formato dalle ostruzioni partendo sempre dal baricentro dell'intero componente finestrato.

superfici opache

- considerare la superficie lorda già definita per il calcolo delle dispersioni di calore per trasmissione;
- trovare il baricentro di tale superficie e da esso determinare la distanza (*d*) e la profondità (*h*) dell'aggetto, fermandosi all'intradosso dell'aggetto stesso;
- analogamente calcolare l'angolo formato dalle ostruzioni partendo sempre dal baricentro della superficie opaca.

Sia per i componenti vetrati che per quelli opachi, in caso di presenza di più aggetti od ostruzioni della stessa tipologia, si potrebbe considerare solo quello che determina l'angolo maggiore.

Un esempio di quanto detto per gli aggetti verticali insistenti su pareti opache è descritto in Figura 2.

Infine si osserva che, per quanto riguarda l'extraflusso, nella norma UNI TS 11300-1 si fa riferimento al fattore di riduzione per ombreggiatura, relativo alla sola radiazione diffusa $F_{sh,ob,dif}$. Di questo fattore non è però chiaro come effettuare il calcolo. Dall'analisi della norma UNI EN ISO 13790 emerge che tale parametro viene descritto solo per il calcolo orario del fabbisogno d'energia dell'involucro edilizio e non per quello mensile o stagionale. La norma UNI TS 11300-1 fa riferimento al calcolo mensile, e pertanto sarebbe utile un chiarimento su come procedere in questo caso per la valutazione del fattore di riduzione per ombreggiatura relativo alla sola radiazione diffusa.

3. COMPONENTI VETRATI

I componenti vetrati rappresentano uno degli elementi più delicati nella progettazione e realizzazione di edifici a basso consumo energetico. Ciò è dovuto principalmente allo scarso grado d'isolamento termico offerto dai vetri tradizionali. Tuttavia negli ultimi anni vi è stato un notevole impegno sia a livello di ricerca che di realizzazione industriale di compenti trasparenti caratterizzati da ridotta trasmittanza. Nel giro di pochi anni i valori della trasmittanza delle finestre sono passati dai circa 3.3 W/(m^{2}K), tipici di doppi vetri con intercapedine d'aria, a 0.5 W/(m^2 K) in riferimento a vetri tripli basso emissivi con intercapedine riempita con gas nobili. Le case produttrici di serramenti forniscono, ai progettisti, certificati di laboratorio che attestano, secondo le norme vigenti, i valori delle trasmittanze raggiunti dai propri prodotti. Nel calcolo del fabbisogno dell'involucro sarebbe utile poter utilizzare tali dati. La norma UNI TS 11300-1 permette esplicitamente di utilizzare i valori certificati, ai fini dei calcoli, solo per i pacchetti opachi, ma parrebbe non considerare tale possibilità per i componenti vetrati.

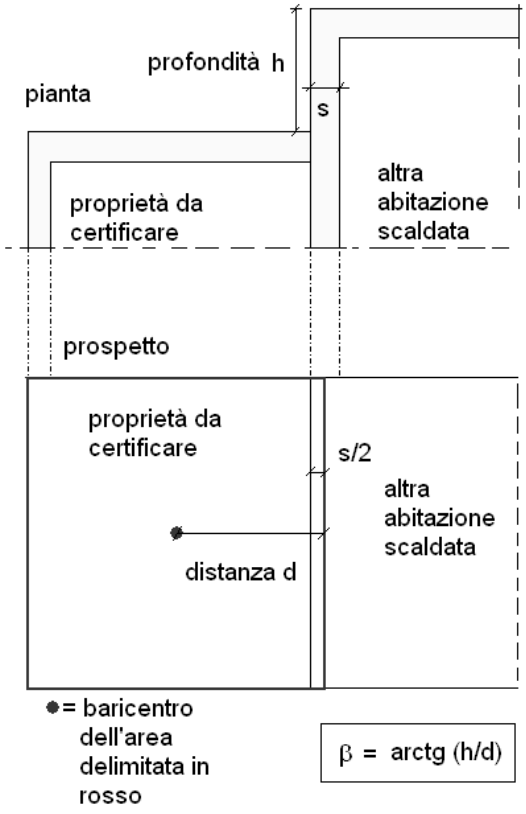


Figura 2. Esempio di determinazione dell'angolo che caratterizza un aggetto verticale su parete opaca.

Sarebbe utile poter disporre di tale opportunità in modo esplicito, con un'indicazione nella caratterizzazione termica degli elementi trasparenti (UNI TS 11300-1 Paragrafo 11.1.2).

Un altro aspetto problematico, concernente i componenti finestrati, riguarda il calcolo degli apporti solari. Nel paragrafo 14.3.2 della UNI TS 11300-1 viene indicato che il telaio della finestra va scorporato dall'area di captazione solare del componente. In tal modo si valuta in maniera corretta il contributo al guadagno solare imputabile al solo vetro. Tuttavia non viene esplicitamente detto se trascurare, o meno, l'apporto solare del telaio considerandolo come componente opaco. Analizzando l'equazione proposta dalla UNI TS 11300-1 per gli apporti solari, Eq. (8), ci si avvede che il flusso termico dipende dall'area di captazione solare effettiva, A_{sol}, la cui formulazione, per componenti opachi, è data dall'Eq. (9):

$$A_{sol} = \alpha_{sol} R_{se} U_c A_c \quad (9)$$

Considerando che in una finestra la percentuale di telaio è dell'ordine del 20% e che mediamente negli edifici le finestre rappresentano circa il 10% delle superfici verticali esterne, si può considerare che il telaio occupa poco più del 2% dei componenti opachi verticali. Tuttavia poiché i colori e il grado d'isolamento delle murature e dei telai possono essere molto differenti, può succedere che l'area di captazione solare effettiva dei telai degli infissi $A_{sol\ telai}$ rappresenti una percentuale considerevole e non trascurabile rispetto alla superficie di captazione solare effettiva dei muri $A_{sol\ muri}$.

Considerando un caso di esempio in cui la superficie delle murature perimetrali sia pari a 90 m^2, mentre l'area dei telai dei serramenti sia di 2 m^2 con le seguenti caratteristiche:

$\alpha_{sol\ muri} = 0.3$ (colore chiaro)
$\alpha_{sol\ telaio} = 0.9$ (colore scuro)
$U_{c\ muri} = 0.2$ W/(m^2 K) (isolamento alto)
$U_{c\ telaio} = 2.8$ W/(m^2 K) (telaio con anima in metallo)

Eseguendo i calcoli si ottiene:

$$\begin{aligned} A_{sol\ muri} &= \alpha_{sol\ muri} R_{se} U_{c\ muri} A_{c\ muri} \\ &= 0.3 \cdot [0.04\ \text{W/(m}^2\ \text{K)}] \cdot [0.2\ \text{W/(m}^2\ \text{K)}] \cdot (90\ \text{m}^2) \quad (10) \\ &= 0.216\ \text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{sol\ telai} &= \alpha_{sol\ telai} R_{se} U_{c\ telai} A_{c\ telai} \\ &= 0.9 \cdot [0.04\ \text{W/(m}^2\ \text{K)}] \cdot [2.8\ \text{W/(m}^2\ \text{K)}] \cdot (2\ \text{m}^2) \quad (11) \\ &= 0.2016\ \text{m}^2 \end{aligned}$$

e quindi il valore di $A_{sol\ telai}$ rappresenta il 48% dell'intera area di captazione solare dei componenti opachi verticali (murature + telai).
Considerando, invece, valori più omogenei di trasmittanza termica e di colore, come ad esempio:

$\alpha_{sol\ muri} = 0.3$ (colore chiaro)
$\alpha_{sol\ telaio} = 0.6$ (colore medio)
$U_{c\ muri} = 0.5$ W/(m^2 K) (isolamento medio)
$U_{c\ telaio} = 1.8$ W/(m^2 K) (telaio in legno tenero)

il valore di A_{sol} del telaio arriva, comunque, a corrispondere quasi al 14% dell'intera area di captazione solare dei componenti opachi verticali (murature e telai).

Alla luce di tali considerazioni si potrebbe stabilire di considerare trascurabile il contributo dei telai allorquando il valore di A_{sol} degli stessi sia inferiore al 10% dell'intera area di captazione solare dei componenti opachi verticali e di calcolarne in tutti gli altri casi il contributo, nei componenti opachi.

4. SUPERFICIE UTILE E SUPERFICIE NETTA

Nella UNI TS 11300 gli apporti interni ed il fabbisogno di acqua calda sanitaria vengono calcolati in funzione della superficie utile (o netta calpestabile) della zona riscaldata. In altre parole viene richiesta, quale parametro di calcolo, la superficie di pavimento al netto dei tramezzi interni. La determinazione di tale area può risultare onerosa, soprattutto in caso d'edifici esistenti e occupati. Di contro l'incidenza delle partizioni verticali interne sulla superficie calpestabile totale è, spesso, piuttosto contenuta in quanto si aggira attorno al 2-3%.

Si è pertanto voluta verificare l'effettiva influenza di detta presenza sul valore finale del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale, in modo tale da poter valutare se si possa, o meno, considerare, anziché la superficie utile, quella netta (vale a dire senza scorporare i tramezzi).

A tal fine sono state condotte alcune analisi e calcoli su una villetta e su un condominio, valutando anche l'eventuale diversa incidenza del clima, in riferimento a tre città campione: Milano, Roma e Catania.

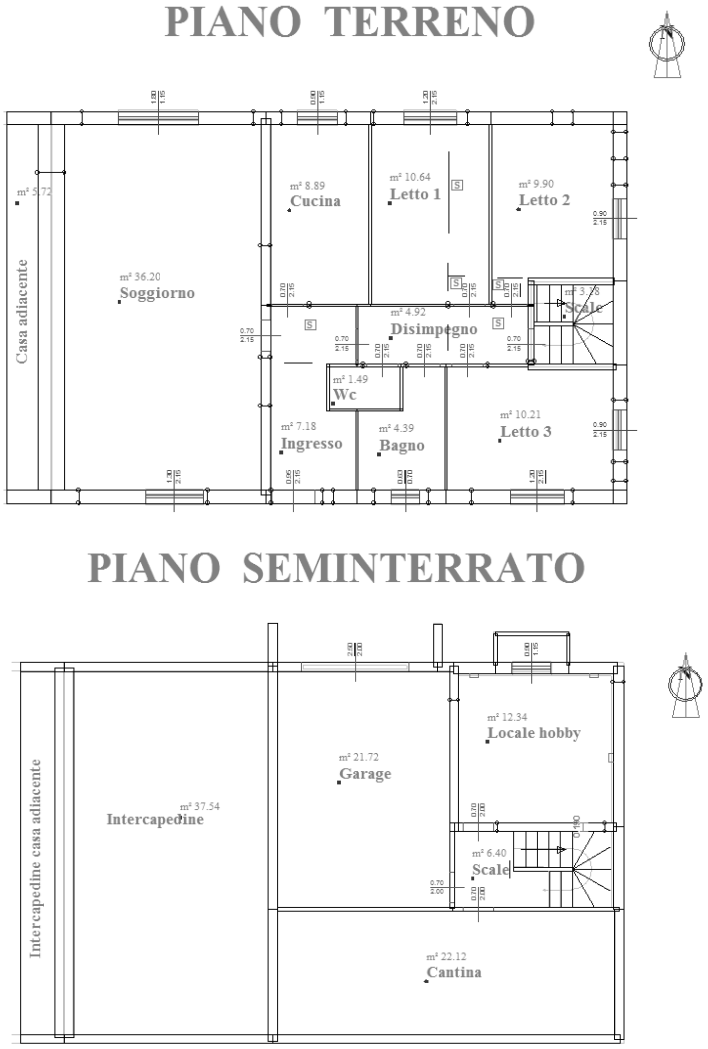


Figura 3. Piante della villa.

La villetta considerata è costituita da due piani (Figura 3): un seminterrato con locale hobby riscaldato adiacente a una cantina e ad un garage, un piano sovrastante, ubicato all'altezza del terreno, adibito ad abitazione. La muratura perimetrale è in mattoni forati e calcestruzzo con isolante (trasmittanza variabile da 0.4 a 2.4 W/(m^2 K)). I serramenti sono in PVC con vetri doppi. L'impianto è costituito da una caldaia a condensazione monostadio da 23 kW, un sistema di regolazione d'ambiente con banda 1°C, e con radiatori come terminali d'emissione.

La superficie utile di pavimento al netto dei tramezzi risulta pari a 106.17 m^2, mentre comprendendo l'area delle partizioni verticali è di 109.65 m^2, con un incremento del 3.3%. In Tabella 6 sono riportati i valori del fabbisogno di energia,

ricavati in riferimento alle tre città campione nei due casi di superficie utile al lordo e al netto dei tramezzi. Come evidenziato in tabella lo scostamento tra i due casi è ridotto, inferiore o al più uguale al 5%.

Tabella 6. Valutazione dello scostamento del fabbisogno di energia primaria per il caso della villa.

	Fabbisogno di energia primaria [MJ]		
Città	**Al lordo tramezze**	**Al netto tramezze**	**Scostamento %**
Milano	43889.44	46183.39	–5.0 %
Roma	28227.06	29292.44	–3.6 %
Catania	17204.29	17627.69	–2.4 %

Il condominio considerato per lo stesso tipo di analisi è costituito da otto appartamenti disposti su quattro piani, con pareti esterne a cassa vuota senza isolante, pareti in calcestruzzo verso vano scale e solai in laterocemento. Sono presenti tapparelle in alluminio con relativo cassonetto non isolato. I serramenti hanno telaio in legno e vetro doppio. Il generatore è multistadio combinato, in acciaio, con potenza termica da 30 a 100 kW, bruciatore ad aria soffiata con chiusura all'aria comburente all'arresto,installato in centrale termica.

La superficie utile di pavimento dell'intero condominio al netto dei tramezzi risulta pari a 641.65 m^2, mentre comprendendo l'area delle partizioni verticali è di 660.00 m^2, con un incremento del 2.9 %. In Tabella 7 sono riportati i valori di fabbisogno energetico, in riferimento alle tre città campione nel caso di superficie utile al lordo e al netto dei tramezzi. Come evidenziato in tabella lo scostamento tra i due casi appare quasi trascurabile in quanto si attesta sul 2-3%.

Tabella 7. Valutazione dello scostamento del fabbisogno di energia primaria per il caso del condominio.

	Fabbisogno di energia primaria [MJ]		
Città	**Al lordo tramezze**	**Al netto tramezze**	**Scostamento %**
Milano	346291.56	339226.92	2.1 %
Roma	212336.24	207535.39	2.3 %
Catania	119220.41	116058.89	2.7 %

Sulla base di queste prime valutazioni, esaminando una più ampia casistica, si potrebbero confermare questi risultati e le seguenti considerazioni preliminari: data la scarsa incidenza delle partizioni verticali interne sul valore del risultato finale, si potrebbe considerare la superficie utile al lordo dei tramezzi interni al posto di quella attualmente prevista dalla normativa, con una notevole semplificazione dei calcoli e del rilievo in fase di sopralluogo, nonché dei potenziali errori da attribuire ai relativi calcoli.

5. VENTILAZIONE NATURALE

Secondo la UNI TS 11300-1 la valutazione standard delle dispersioni per ventilazione naturale degli edifici residenziali viene eseguita imponendo un ricambio orario pari a 0.3 volumi/ora per tutti gli edifici, indipendentemente dall'epoca di costruzione e dallo stato dei serramenti in essi presenti. Nonostante ciò alcune procedure di calcolo regionali (tra esse, per esempio, la procedura di calcolo di Regione Lombardia di cui al Decreto n. 5796 dell'11 giugno 2009) propongono di utilizzare per il calcolo un valore di 0.3 volumi/ora di ricambio d'aria per gli edifici di nuova costruzione (ed eventualmente per quelli esistenti che presentino buona tenuta all'aria), ma indicano per gli edifici esistenti 0.5 volumi/ora di ricambio d'aria per areazione e infiltrazioni. Il calcolo così condotto può però introdurre notevoli scostamenti rispetto ai risultati ottenuti sulla base delle indicazioni della UNI TS 11300-1.

Al fine di un'analisi quantitativa di questo aspetto, si sono utilizzati gli stessi due edifici (villetta e condominio) del paragrafo precedente considerando 0.3 e 0.5 volumi/ora di ricambio nelle tre città campione Milano, Roma e Catania.

I valori del fabbisogno di energia primaria dell'edificio per la climatizzazione invernale sono riportati in Tabella 8 per la villetta e in Tabella 9 per il condominio.

Tabella 8. Valutazione del fabbisogno di energia primaria per il caso della villa.

	Fabbisogno di energia primaria [MJ]		
Città	**0.3 vol/h**	**0.5 vol/h**	**Scostamento %**
Milano	46183.39	50805.22	10.0 %
Roma	29292.44	32228.68	10.0 %
Catania	17627.69	19415.30	10.1 %

Tabella 9. Valutazione del fabbisogno di energia primaria per il caso del condominio.

	Fabbisogno di energia primaria [MJ]		
Città	**0.3 vol/h**	**0.5 vol/h**	**Scostamento %**
Milano	335563.78	368374.97	9.8 %
Roma	207535.39	225124.52	8.5 %
Catania	116058.89	127535.58	9.9 %

Dall'analisi di entrambe le tabelle risulta che il calcolo delle perdite per ventilazione degli edifici residenziali con ventilazione naturale eseguito con 0.5 volumi/ora (invece degli 0.3 volumi/ora prescritti dalla UNI TS 11300-1) porta a ottenere un valore del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale che differisce di ben il 10% rispetto a quello ottenuto seguendo le indicazioni della UNI TS 11300-1. Si osserva che con l'uso di ricambi orari differenti da 0.3 volumi/ora lo scostamento del risultato finale è maggiore del 5%, valore di riferimento considerato nelle Linee Guida nazionali come massimo scostamento dall'applicazione della UNI TS 11300 per i software di calcolo (riferito però solo a quelli commerciali).

Un altro aspetto che si può sottolineare, a proposito della ventilazione riguarda la valutazione del volume netto da quello lordo.

Per il calcolo delle perdite per ventilazione, la UNI TS 11300-1 propone un fattore di correzione per la determinazione del volume netto di un edificio a partire dal volume lordo (Prospetto 7).

Moltiplicando il volume lordo per tale fattore, funzione della tipologia edilizia, si introduce un'approssimazione ben più forte di quella valutata e discussa nel paragrafo precedente

relativa all'opportunità o meno di includere i tramezzi nel calcolo della superficie utile.

Il calcolo delle dispersioni dovute alla ventilazione viene effettuato proprio sulla base del volume netto riscaldato, pertanto introdurre un'approssimazione su tale parametro comporta un errore nella valutazione del flusso termico scambiato per ventilazione. Tale approssimazione, sembra essere in contrasto con la necessità di valutazione accurata della superficie utile (con scorporo dei tramezzi), dal momento che il calcolo del volume netto non è solitamente particolarmente complesso e comporta unicamente la determinazione dell'altezza interna dei locali.

CONCLUSIONI

Gli aspetti discussi in questo lavoro evidenziano la complessità dell'applicazione della UNI TS 11300 parte 1 in relazione ad alcuni aspetti particolari che però possono essere significativi nella definizione degli indici di prestazione energetica.

In questo lavoro si sono voluti evidenziare alcuni aspetti che possono risultare di difficile interpretazione nella valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici secondo la UNI TS 11300, in relazione alle parti 1 e 2.

Tenuto conto della caratteristica principale della norma, che dovrebbe rappresentare una guida per l'applicazione di un sistema di norme ben più ampio e che prevede una revisione in tempi brevi, rispetto a quanto previsto per le norme UNI essendo stata emanata sotto forma di rapporto tecnico (TS), si può auspicare una rapida risoluzione delle problematiche evidenziate.

NOMENCLATURA

A_c = area proiettata del componente opaco [m^2],
$A_{sol,k}$ = area effettiva di captazione solare del k-esimo componente edilizio [m^2],
b_{tr} = fattore di correzione dello scambio termico tra ambienti climatizzato e non climatizzato [-],
F_{hor} = fattore d'ombreggiatura relativo ad ostruzioni esterne [-],
F_{ov} = fattore d'ombreggiatura relativo ad aggetti orizzontali [-],
F_{fin} = fattore d'ombreggiatura relativo ad aggetti verticali [-],
$F_{r,k}$ = fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste [-],
$F_{sh,ob,k}$ = fattore di riduzione della radiazione solare per ombreggiatura del k-esimo elemento [-],
$F_{sh,ob,dif}$ = fattore di riduzione per ombreggiatura relativo alla sola radiazione diffusa [-],
h_r = coefficiente di scambio termico esterno per irraggiamento [$W/(m^2 K)$],
$H_{tr,adj}$ = coefficiente globale di scambio termico per trasmissione [W/K],
I_{sol} = irradianza solare [W/m^2],
Q_h = fabbisogno di energia dell'involucro per la climatizzazione invernale [MJ],
$Q_{H,nd}$ = fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per riscaldamento [MJ],
$Q_{H,tr}$ = scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento [MJ],
$Q_{H,ve}$ = scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento [MJ],
Q_{int} = apporti termici interni [MJ],
Q_{sol} = apporti termici solari [MJ],
$Q_{,tr}$ = scambio termico per trasmissione [MJ],
R_{se} = resistenza termica superficiale esterna del componente opaco, determinata secondo UNI EN ISO 6946 [6] [$(m^2K)/W$],
t = durata del mese considerato [s],
U_c = trasmittanza termica del componente opaco $W/(m^2 K)$],
α_{sol} = fattore di assorbimento solare del componente opaco [-],
$\Delta\theta_{er}$ = differenza di temperatura tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura apparente del cielo [K],
ε = emissività relativa alla radiazione termica ad elevata lunghezza d'onda [-],
$\eta_{H,gn}$ = fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti [-],
θ_a = temperatura dell'ambiente a differente temperatura adiacente all'ambiente climatizzato considerato [°C],
θ_e = temperatura giornaliera media mensile esterna [°C],
θ_i = temperatura interna dell'ambiente climatizzato [°C],
$\theta_{int,set}$ = temperatura interna di regolazione dell'ambiente climatizzato [°C],
$\Phi_{r,k}$ = extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste dal componente edilizio k -esimo, mediato sul tempo [W],
Φ_{sol} = guadagno solare effettivo [W],
$\Phi_{sol,u}$ = flusso termico dovuto all'irraggiamento solare nell'ambiente non climatizzato adiacente u [W]

RIFERIMENTI NORMATIVI

1. UNI/TS 11300-1 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, 2008
2. UNI/TS 11300-2 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, 2008
3. D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del D.Lgs 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia
4. D.M. (Sviluppo Economico) 26 giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.
5. UNI EN ISO 13790 Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, 2008
6. UNI EN ISO 6946 Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo, 2008
7. UNI EN ISO 13789 Prestazione termica degli edifici - Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione - Metodo di calcolo, 2008
8. UNI EN ISO 13370 Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo, 2008

UNI TS 11300 PARTE 2 – APPLICAZIONE A CASI SEMPLICI DI EDILIZIA RESIDENZIALE: CONSIDERAZIONI SULLE MODALITÀ DI CALCOLO E PROPOSTE PER UNA MAGGIORE COMPRENSIONE DI ALCUNI ASPETTI

Anna Magrini, Lucia Cattani, Lorenza Magnani

Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale, Università degli Studi di Pavia,
Via Ferrata 1, 27100 Pavia – magrini@unipv.it

SOMMARIO

L'analisi ha per oggetto alcuni aspetti relativi all'applicazione delle procedure contenute nella norma UNI TS 11300 parte 2. La norma rappresenta la guida nazionale per l'applicazione delle indicazioni contenute nella Direttiva Europea 91/2002/CE; la parte 2 riguarda la determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. Come per la parte 1, emergono talvolta dubbi sulla corretta esecuzione dei calcoli. Alcune precisazioni potrebbero migliorarne la comprensione. Inoltre le possibilità offerte dalle alternative di calcolo potrebbero portare a differenze anche consistenti nei risultati. Su questi aspetti si presentano alcune riflessioni e si propongono alcune interpretazioni relative ad un approccio più lineare per una maggiore definizione del problema che in alcuni casi consentirebbe di realizzare un migliore compromesso tra l'affidabilità dei risultati e la semplicità e rapidità di esecuzione dei calcoli. Per esempio, talvolta, procedure semplificate potrebbero condurre a differenze con i risultati del calcolo dettagliato non particolarmente significative. Quest'analisi costituisce un primo esame delle problematiche messe in evidenza. Per convalidare queste considerazioni, tuttavia, occorrerà una più approfondita indagine su un'ampia casistica.

Le indagini sono state sviluppate sulla base di casi studio rappresentativi di edifici residenziali, e riguardano alcuni aspetti relativi in particolare al fattore di carico, alla valutazione del fabbisogno per acqua calda sanitaria ed al rendimento di regolazione.

INTRODUZIONE

La norma UNI TS 11300 parte 2 descrive in dettaglio la procedura per la determinazione dei rendimenti degli impianti di riscaldamento di tipo tradizionale e quindi la metodologia per ricavare il consumo di energia primaria del sistema edificio-impianto. In particolare, la specifica tecnica fornisce dati e metodi per la determinazione del fabbisogno di energia utile per acqua calda sanitaria, dei rendimenti e dei fabbisogni di energia elettrica degli ausiliari dei sistemi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria e dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

Essa si applica a sistemi di nuova progettazione, ristrutturati o esistenti, per il solo riscaldamento, impianti misti o combinati per riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria o per sola produzione di acqua calda per usi igienico-sanitari.

Il calcolo del fabbisogno di energia primaria è basato sul calcolo delle perdite di energia nelle varie sezioni che compongono l'impianto (sottosistemi). Vengono indicati due livelli di calcolo:

- un livello semplificato basato su valori precalcolati contenuti in tabelle nelle quali sono precisate le condizioni al contorno che fissano i limiti di applicazione delle tabelle
- metodi di calcolo dettagliato per determinare le perdite d'impianto nei casi più complessi o comunque quando non possano essere utilizzati i valori delle tabelle

Da un'analisi dell'applicazione di questa parte come della prima sono stati riscontrati alcuni elementi che potrebbero condurre a una non univoca applicazione delle prescrizioni contenute in essa. Ci si propone pertanto di evidenziare alcuni degli aspetti sulla base di semplici esempi di calcolo.

1. UNI TS 11300-2 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Anche nella norma UNI TS 11300-2 si possono evidenziare alcuni passaggi piuttosto complessi che possono portare i professionisti ad un'interpretazione non univoca della stessa procedura da seguire. Verranno pertanto presentate qui di seguito alcune piccole osservazioni, mentre nei paragrafi successivi saranno evidenziati alcuni aspetti per i quali è possibile che diverse interpretazioni portino a risultati finali molto differenti tra loro.

Innanzi tutto il simbolo utilizzato nella UNI TS 11300-1 e quello riportato nella UNI TS 11300-2 per indicare l'energia termica per l'involucro non coincidono. Nella UNI TS 11300-1, infatti, si fa riferimento al fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per riscaldamento con il simbolo $Q_{H,nd}$, mentre nella UNI TS 11300-2 la stessa grandezza viene indicata con il simbolo Q_h.

Nel seguito si farà riferimento al fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per riscaldamento attraverso il simbolo $Q_{H,nd}$.

Inoltre nella UNI TS 11300-1 l'unità di misura adottata per i fabbisogni di energia termica è il megajoule (MJ) mentre nella UNI TS 11300-2 è il wattora (Wh).

L'energia termica per il riscaldamento, peraltro, è il dato principale di input. Infatti sommando ad essa le perdite d'impianto e degli ausiliari elettrici e considerando i corretti fattori di conversione e gli eventuali recuperi si ottiene l'energia primaria per il riscaldamento. In maniera analoga si può procedere per calcolo del consumo di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria, a partire dal fabbisogno dell'acqua calda stessa.

Le perdite dipendono dai rendimenti e/o dalle caratteristiche d'isolamento dei sottosistemi che compongono

l'impianto. A differenza del tipo di valutazione di consumi energetici che si intende eseguire (di progetto, standard o di diagnosi) si possono scegliere metodi di calcolo semplificati od analitici. I primi consentono di avvalersi di tabelle che forniscono valori precalcolati dei rendimenti per i principali sistemi impiantistici. Seguendo tale approccio viene precisato, in diversi punti della norma, che tutti i recuperi di energia termica vanno trascurati, siano essi imputabili alla produzione di acqua calda sanitaria e/o alla trasformazione di parte dell'elettricità d'alimentazione degli ausiliari in calore.

Nell'esempio di calcolo riportato nella norma, svolto con metodo semplificato (Par. 6.11, Prospetto 32 UNI TS 11300-2), il conteggio viene eseguito considerando i recuperi del sistema di distribuzione per la produzione di acqua calda sanitaria. Tale calcolo sembra essere quindi in contraddizione con quanto più volte ribadito nel corso della norma stessa.

I metodi analitici consentono un calcolo più aderente alle effettive condizioni d'esercizio dell'immobile considerato. Nel caso ci si debba avvalere di questi ultimi si possono considerare, nel bilancio, tutti i recuperi termici derivanti dalla produzione di acqua calda sanitaria e dalla presenza di sistemi elettrici ausiliari.

Anche al calcolo analitico è associata qualche tabella che consente al professionista di utilizzare alcune informazioni standardizzate per la determinazione delle dispersioni, in caso non possano reperire tutti i dati reali.

Non sembrano però disponibili indicazioni relative alle frazioni recuperabili dell'energia termica derivante dagli ausiliari elettrici. Informazioni queste che sarebbero molto utili, eventualmente sotto forma di schemi o tabelle, in quanto difficilmente ipotizzabili dall'utilizzatore.

Il fabbisogno di energia elettrica di un impianto di riscaldamento deve essere calcolato come somma del fabbisogno di energia elettrica dei sottosistemi di emissione, distribuzione e generazione (Paragrafo 6.7, UNI TS 11300-2).

Il fabbisogno di energia elettrica degli ausiliari può essere determinato:

a. in sede di progettazione dell'impianto;
b. con misure sull'impianto;
c. con metodi di calcolo basati su parametri di riferimento.

La norma stabilisce che, mentre per edifici di nuova costruzione è necessario usare i dati di progetto (a), nel caso degli impianti esistenti è possibile ricorrere a misure sull'impianto (b) oppure a procedure di calcolo basate su una serie di dati caratteristici dell'edificio e dell'impianto (c).

Per queste ultime la norma riporta alcune metodologie per il calcolo delle potenze elettriche di vari ausiliari (pompe di distribuzione, ventilatori dei ventilconvettori, bruciatori dei generatori di calore), anche se potrebbe essere forse più utile fare riferimento ad una tabella esplicativa riassuntiva dei fabbisogni standardizzati degli ausiliari per gli elementi d'impianto più diffusi.

Un altro aspetto da sottolineare riguarda la scelta del rendimento dei terminali di emissione, in quanto non è chiaro come comportarsi in caso di presenza di terminali diversi all'interno dell'edificio. Infatti, per gli impianti di riscaldamento, il calcolo delle perdite del sottosistema di emissione viene effettuato attraverso la determinazione del rendimento dell'emissione (Par. 6.6.1, UNI TS 11300-2). Questo può essere ricavato dai Prospetti 17 e 18 sulla base di alcuni parametri quali:

- tipologia di terminali di erogazione presenti nell'edificio, altezza netta dei locali,
- carico termico specifico

Il carico termico specifico dipende dal fabbisogno annuo di energia termica utile e dal volume lordo riscaldato del locale o della zona termica ove i terminali sono installati.

In caso di presenza di terminali differenti all'interno dello stesso locale non è specificato come calcolare un rendimento medio del sottosistema di emissione, e come suddividere il carico termico. Una prima possibilità sarebbe quella di calcolare il rendimento del sottosistema di emissione come media pesata dei rendimenti dell'emissione delle varie zone, utilizzando come peso il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento di ciascuna zona. Un'alternativa potrebbe essere invece quella di utilizzare come fattore di peso nel calcolo del rendimento dell'emissione il volume netto o il volume lordo di ciascun ambiente che presenti terminali di emissione di differente tipologia. Allo stato attuale il professionista si trova costretto ad operare una scelta soggettiva.

Infine si sottolinea che delle due equazioni (31 e 32 UNI TS 11300-2) per il calcolo delle dispersioni del sistema d'accumulo l'Eq. (1) parrebbe essere l'unica da utilizzarsi nel caso che il serbatoio d'accumulo sia un sottosistema dell'impianto di riscaldamento:

$$Q_{l,W,s} = \frac{S_s}{d_s}(\theta_s - \theta_{ac})t\lambda_s \qquad (1)$$

$$Q_{l,W,s} = k_{boll}(\theta_s - \theta_{ac})t \qquad (2)$$

Viceversa, nel caso che il serbatoio sia utilizzato per stoccare acqua calda sanitaria, sembra che si possa usare anche l'Eq. (2), qualora sia disponibile il valore della dispersione termica dell'apparecchio k_{boll}, dichiarato dal costruttore.

Da una prima analisi sembrerebbe ragionevole poter utilizzare l'Eq. (2) anche in caso di accumulo appartenente al riscaldamento. Inoltre l'Eq. (1) esprime lo scambio termico per conduzione tra l'acqua contenuta nel serbatoio e l'ambiente circostante. Sarebbe forse opportuno considerare un approccio fisicamente più appropriato, tenendo conto anche dei contributi, anche se non sempre rilevanti, di irraggiamento e convezione, ad esempio, mediante un coefficiente liminare esterno da inserire nella formula.

2. FATTORE DI CARICO

Per effettuare il calcolo delle perdite dell'impianto di generazione è possibile operare secondo il metodo semplificato, utilizzando fattori correttivi.

Tali fattori, in tutto sette, si ricavano in funzione dei parametri di funzionamento del generatore e rappresentano, quasi tutti, direttamente punti percentuali che vanno sottratti ai rendimenti di base delle caldaie.

Il primo di questi è però definito come rapporto fra la potenza del generatore installato e la potenza di progetto richiesta. Tale parametro, chiamato F1, non rappresenta quindi una percentuale da togliere al rendimento di base. Apposite tabelle (Prospetti 23, analoghi a Tabella 1) riportano la percentuale di penalizzazione del rendimento in relazione ad alcuni valori assunti da F1.

Non è chiaramente definito il procedimento di calcolo del valore percentuale in caso che F1 assuma valori intermedi a quelli riportati nelle tabelle. Si potrebbe procedere per interpolazione lineare, ma, analizzando l'esempio di calcolo

contenuto nella UNI TS 11300-2, tale ipotesi pare non essere applicata.

Tabella 1. Esempio di tabella che lega ai valori di F1 la percentuale da togliere al rendimento di base.

Caldaia ad aria soffiata 2 stelle			
Valore di F1	1	1.25	1.5
Percentuale da togliere	0	–1	–2

Infatti per una caldaia ad aria soffiata, 2 stelle con F1 = 1.47, il valore della percentuale da togliere al valore di riferimento viene assunto pari a –2 anziché –1.88. Non è chiaro però se si tratti di un arrotondamento oppure di esplicita volontà di considerare l'estremo superiore dell'intervallo.

Sarebbe utile poter disporre di informazioni più dettagliate, in quanto considerare sempre gli estremi superiori dell'intervallo nelle tabelle riguardanti F1 può portare a sovrastima della penalizzazione del rendimento del generatore superiore al 3%.

3. ACQUA CALDA SANITARIA: METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Per il calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e la produzione di ACS è possibile procedere secondo un metodo semplificato (Paragrafo 6.8, UNI TS 11300-2). Nel caso di edifici con produzione di acqua calda sanitaria con sistema combinato (generatore autonomo combinato o sistema centralizzato combinato) il metodo consente, nei periodi di attivazione del riscaldamento, di utilizzare come dato di input dell'impianto di riscaldamento la somma tra il fabbisogno d'energia termica per acqua calda sanitaria e quello necessario per il riscaldamento dell'involucro.

In altre parole, come indicato nell'Esempio 6.11 della norma, si somma al fabbisogno di energia termica dell'involucro $Q_{H,nd}$ il fabbisogno di acqua calda sanitaria Q_W ottenendo il fabbisogno totale $Q_{H,nd,adj}$ e si prosegue nel calcolo delle perdite dell'impianto considerando i sottosistemi di emissione, regolazione, distribuzione, accumulo e generazione del solo impianto di riscaldamento applicando i rendimenti al fabbisogno $Q_{H,nd,adj}$.

Il risultato finale sarà l'energia primaria necessaria sia per mantenere la temperatura desiderata nell'edificio sia per produrre l'acqua calda sanitaria durante la stagione di riscaldamento.

Tuttavia si osserva che l'unico sottosistema in comune tra l'impianto di riscaldamento e quello di produzione dell'acqua calda sanitaria è la caldaia combinata, mentre, in generale, i sottosistemi di erogazione, distribuzione e accumulo sono differenti (e con differenti rendimenti). Per questa ragione sembrerebbe più opportuno procedere con il calcolo separato delle perdite dei sottosistemi (emissione, regolazione, distribuzione e accumulo) dell'impianto di riscaldamento e dell'impianto di produzione di acqua calda sanitaria.

A tal fine si dovrebbero utilizzare come dati di input il solo fabbisogno dell'involucro $Q_{H,nd}$ per le perdite imputabili al riscaldamento ed il solo fabbisogno Q_W per la determinazione delle perdite la produzione di acqua calda sanitaria.

Sommando le perdite dei sottosistemi dell'impianto di riscaldamento al fabbisogno $Q_{H,nd}$ si ottiene l'energia in uscita dal sistema di generazione relativa al riscaldamento $Q_{H,gn,out}$ e sommando le perdite dei sottosistemi di produzione di acqua calda sanitaria al fabbisogno Q_w si ottiene l'energia in uscita dal sistema di generazione relativa all'ACS $Q_{W,gn,out}$.

Sulla base della somma di $Q_{H,gn,out}$ e $Q_{W,gn,out}$ si possono determinare le perdite del sottosistema di generazione e la corrispondente energia primaria.

Si consideri, come esempio di applicazione di questi due differenti criteri, un caso che porta ad evidenziare come il metodo semplificato proposto nella UNI TS 11300-2 sovrastimi le perdite legate alla produzione di acqua calda sanitaria.

Il calcolo è stato eseguito considerando un appartamento, avente superficie utile di 64.86 m^2, situato a Milano in una palazzina di tre piani, con impianto di riscaldamento autonomo combinato. Scegliendo come mese di riferimento dicembre si ottengono:

fabbisogno di energia per il riscaldamento

$Q_{H,nd}$ = 7909.42 MJ

fabbisogno di acqua calda sanitaria

Q_W = 355.18 MJ.

Il sottosistema di emissione dell'impianto di riscaldamento è costituito da radiatori su parete esterna isolata (carico termico > 10 W/m^3) per cui si considera un rendimento pari a η_e = 0.92 (Prospetto 17 della UNI TS 11300-2).

Il sottosistema di regolazione presenta un termostato di zona on-off il cui rendimento risulta η_{rg} = 0.93 (Prospetto 20), mentre il sottosistema di distribuzione è autonomo realizzato tra il 1977 e il 1993 per cui si considera η_d = 0.98 (Prospetto 21a).

Il rendimento del sistema di generazione si calcola in base al Prospetto 23b della UNI TS 11300-2: generatori di calore a camera stagna tipo C per impianti autonomi classificati 3 stelle, e, applicando gli opportuni fattori di correzione, si ha un rendimento η_{gn} = 0.87.

L'erogazione dell'acqua calda sanitaria ha rendimento η_{er} = 0.95, mentre il corrispondente sottosistema di distribuzione, installato dopo l'entrata in vigore della legge 373/76 (Prospetto 30) presenta un coefficiente di perdita $f_{l,W,d}$ = 0.08.

Applicando il *metodo semplificato* proposto dalla UNI TS 11300-2 (Par 6.11) per il calcolo del fabbisogno di energia primaria dell'appartamento, prima di procedere alla determinazione delle perdite, si somma al fabbisogno netto dell'involucro $Q_{H,nd}$ il fabbisogno di acqua calda sanitaria Q_W ottenendo il fabbisogno di energia di cui si deve fare carico l'impianto di riscaldamento:

$$Q_{H,nd,adj} = Q_{H,nd} + Q_W = \\ = (7909.42 + 355.18)\ \text{MJ} = 8264.60\ \text{MJ} \qquad (14)$$

Il calcolo delle perdite dei sottosistemi dell'impianto di riscaldamento è riportato in Tabella 2 nella quale si riporta il fabbisogno di energia primaria calcolato (a meno degli ausiliari) pari a 11329.36 MJ.

Eseguendo invece il calcolo delle perdite separatamente per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria si ottiene un fabbisogno di energia primaria (a meno degli ausiliari) pari a 10864.48 MJ (Tabella 3 e Tabella 4).

Il calcolo delle perdite dei sottosistemi dell'impianto di riscaldamento è stato effettuato facendo riferimento al solo fabbisogno dell'involucro $Q_{H,nd}$ = 7909.42 MJ, mentre il calcolo delle perdite dei sottosistemi dell'acqua calda sanitaria è stato condotto a partire dal fabbisogno di ACS Q_W = 355.18 MJ.

Tabella 2. Calcolo delle perdite con il metodo semplificato.

Fabbisogno	$Q_{H,nd,adj} = Q_{H,nd} + Q_W$ = (7909.42 + 355. 18) MJ = 8264.60 MJ
Tipologia	Radiatori su parete esterna isolata
Rendimento	$\eta_e = 0.92$
Perdite	$Q_{l,e} = Q_{H,nd} \cdot \frac{1-\eta_e}{\eta_e}$ $= (8264.60\,\text{MJ}) \cdot \frac{1-0.92}{0.92}$ $= 718.66\,\text{MJ}$
Fabbisogno	$Q_{H,gn,out} = Q_{H,nd} + Q_{l,e}$ = (8264.60 + 718.66) MJ = 8983.26 MJ
Tipologia	Termostato di zona on off
Rendimento	$\eta_{rg} = 0.93$
Perdite	$Q_{l,rg} = (Q_{H,nd} + Q_{l,e}) \cdot \frac{1-\eta_{rg}}{\eta_{rg}}$ $= (8983.26\,\text{MJ}) \cdot \frac{1-0.93}{0.93}$ $= 676.16\,\text{MJ}$
Fabbisogno	$Q_{H,nd} + Q_{l,e} + Q_{l,rg} =$ = (8264.60 + 718.66 + 676.16) MJ = 9659.42 MJ
Tipologia	Autonomo, isolamento discreto
Rendimento	$\eta_d = 0.98$
Perdite	$Q_{l,d} = (Q_{H,nd} + Q_{l,e} + Q_{l,rg}) \cdot \frac{1-\eta_d}{\eta_d}$ $= (9659.42\,\text{MJ}) \cdot \frac{1-0.98}{0.98}$ $= 197.13\,\text{MJ}$
Fabbisogno	$Q_{H,nd} + Q_{l,e} + Q_{l,rg} + Q_{l,d} =$ =(8264.60 + 718.66 + 676.16 + 197.13) MJ = 9856.55 MJ
Tipologia	Caldaia a camera stagna tipo C ***
Rendimento	$\eta_{gn} = 0.87$
Perdite	$Q_{l,gn} = (Q_{H,nd} + Q_{l,e} + Q_{l,rg} + Q_{l,d}) \cdot \frac{1-\eta_{gn}}{\eta_{gn}}$ $= (9856.55\,\text{MJ}) \cdot \frac{1-0.87}{0.87}$ $= 1472.82\,\text{MJ}$
Fabbisogno	$Q_{H,nd} + Q_{l,e} + Q_{l,rg} + Q_{l,d} + Q_{l,gn} =$ = (8264.60 + 718.66 + 197.13 + 1472.82) MJ = 11329.36 MJ

Tabella 3. Calcolo delle perdite dell'impianto di riscaldamento.

Fabbisogno	$Q_{H,nd} = 7909.42$ MJ
Tipologia	Radiatori su parete esterna isolata
Rendimento	$\eta_e = 0.92$
Perdite	$Q_{l,e} = Q_{H,nd} \cdot \frac{1-\eta_e}{\eta_e}$ $= (7909.42\,\text{MJ}) \cdot \frac{1-0.92}{0.92}$ $= 687.78\,\text{MJ}$
Fabbisogno	$Q_{H,nd} + Q_{l,e} =$ = (7909.42 + 687.78) MJ = 8597.19 MJ
Tipologia	Termostato di zona on off
Rendimento	$\eta_{rg} = 0.93$
Perdite	$Q_{l,rg} = (Q_{H,nd} + Q_{l,e}) \cdot \frac{1-\eta_{rg}}{\eta_{rg}}$ $= (8597.19\,\text{MJ}) \cdot \frac{1-0.93}{0.93}$ $= 647.10\,\text{MJ}$
Fabbisogno	$Q_{H,nd} + Q_{l,e} + Q_{l,rg} =$ = (7909.42 + 687.78 + 647.10) MJ = 9244.29 MJ
Tipologia	Autonomo, isolamento discreto
Rendimento	$\eta_d = 0.98$
Perdite	$Q_{l,d} = (Q_{H,nd} + Q_{l,e} + Q_{l,rg}) \cdot \frac{1-\eta_d}{\eta_d}$ $= (9244.29\,\text{MJ}) \cdot \frac{1-0.98}{0.98}$ $= 188.66\,\text{MJ}$
Fabbisogno	$Q_{H,gn,out} =$ $= Q_{H,nd} + Q_{l,e} + Q_{l,rg} + Q_{l,d}$ = (7909.42 + 687.78 + 647.10 + 188.66) MJ = 9432.95 MJ

Sommando i fabbisogni in uscita dal sottosistema di generazione:

$$Q_{H,gn,out} + Q_{W,gn,out} = (9432.95 + 147.26)\,\text{MJ} = 9580.22\,\text{MJ} \quad (15)$$

e utilizzando il rendimento del sottosistema di generazione (pari a 0.87) si ottengono 1431.53 MJ di perdite e un fabbisogno di energia primaria (a meno degli ausiliari) pari a 10864.48 MJ.

Lo scostamento tra i valori trovati con i due metodi è di circa il 4%. Tale scostamento arriva al 12% considerando i mesi di ottobre e aprile (temperatura esterna giornaliera media mensile 14 °C).

Tabella 4. Calcolo delle perdite dell'impianto di produzione di ACS.

Fabbisogno	Q_W = 355. 18 MJ
Tipologia	Erogatori ACS
Rendimento	η_{er} = 0.95
Perdite	$Q_{l,er} = Q_W \cdot \frac{1-\eta_{er}}{\eta_{er}} = (355.18\,\text{MJ}) \cdot \frac{1-0.95}{0.95} = 18.69\,\text{MJ}$
Fabbisogno	$Q_W + Q_{l,er}$ = = (355. 18 + 18.69) MJ = 117.35 MJ
Tipologia	Post 373/76
Rendimento	$f_{l,W,d}$ = 0.08
Perdite	$Q_{l,d} = Q_W \cdot \frac{f_{l,W,d}}{\eta_{er}} = (355.18\,\text{MJ}) \cdot \frac{0.08}{0.95} = 29.91\,\text{MJ}$
Fabbisogno	$Q_W + Q_{l,er} + Q_{l,d}$ = = (355. 18 + 18.69 + 29.91) MJ = 147.26 MJ

4. RENDIMENTO DI REGOLAZIONE CLIMATICA CENTRALIZZATA

Per la determinazione dell'energia primaria per il riscaldamento dell'edificio nell'UNI TS 11300-2. si considera il calcolo di tutte le dispersioni eseguito su base *mensile*, mentre nell'Esempio 6.8.1 relativo al calcolo semplificato vengono utilizzati i valori *stagionali*.

Il problema si pone per la determinazione del rendimento della regolazione in caso di regolazione climatica centralizzata. In questo caso, infatti, per calcolare il corrispondente rendimento, vanno considerati i valori del fattore di utilizzazione $\eta_{H,gn}$ e del rapporto apporti/perdite γ.

Tali parametri variano di mese in mese, e, di conseguenza, cambierebbe per ogni mese il valore del rendimento della regolazione climatica.

Si è voluto analizzare il risultato ottenuto in termini di energia primaria per il riscaldamento valutato su base mensile e stagionale, considerando un appartamento inserito in un edificio con distribuzione a colonne montanti risalenti al 1983 (rendimento del sottosistema di distribuzione pari a 0.927 secondo il Prospetto 21d) e con caldaia centralizzata avente rendimento di generazione 0.89.

I risultati ottenuti calcolando mese per mese, durante la stagione di riscaldamento, il rapporto apporti/perdite γ e il fattore di utilizzazione $\eta_{H,gn}$ e conseguentemente il rendimento del sistema di regolazione sono riassunti in Tabella 5, mentre i corrispondenti valori ricavati considerando il fabbisogno stagionale sono riportati in Tabella 6.

Risulta in questa valutazione uno scostamento molto ridotto in quanto esso si mantiene nell'ordine dell'1%, per cui parrebbe che il calcolo condotto con il fabbisogno stagionale non porti in questo senso a significativi scostamenti rispetto al calcolo eseguito con riferimento ai valori mensili.

Tabella 5. Calcolo mensile del rendimento di regolazione climatica e del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento.

Periodo	**Rapporto apporti / perdite γ**	**Fattore di utilizzazione $\eta_{H,gn}$**	**Rendimento di regolazione η_{rg}**	**Fabbisogno di energia primaria (MJ)**
Ottobre	0.391	0.721	0.831	2112.01
Novembre	0.201	0.834	0.899	7749.81
Dicembre	0.145	0.875	0.924	11298.70
Gennaio	0.134	0.883	0.929	12259.66
Febbraio	0.155	0.867	0.919	9523.57
Marzo	0.224	0.819	0.890	7118.75
Aprile	0.391	0.831	0.721	1863.54
Totale				51926.03

Tabella 6. Calcolo stagionale del rendimento di regolazione climatica e del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento.

Periodo	**Rapporto apporti/ perdite γ**	**Fattore di utilizzazione $\eta_{H,gn}$**	**Rendimento di regolaz. η_{rg}**	**Fabbisogno di energia primaria per il riscaldam. (MJ)**
Stagionale	0.184	0.846	0.907	51794.55

CONCLUSIONI

In questo lavoro si sono voluti evidenziare alcuni aspetti che possono risultare di difficile interpretazione nella valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici secondo la UNI TS 1130 parte 2.

Occorre tener conto della caratteristica principale della norma, che fondamentalmente nasce come specifica tecnica. Le tre forme di pubblicazione esistenti in ISO, CEN ed UNI sono costituite da norma tecnica, specifica tecnica (TS) o rapporto tecnico (TR). La Specifica Tecnica, in ambito nazionale, (UNI/TS) è un documento tecnico ad applicazione volontaria elaborato e pubblicato sulla base di una specifica procedura UNI, messo a punto consensualmente da parti interessate che svolgono attività a livello nazionale. Esso rappresenta uno "stato dell'arte" non ancora consolidato di prodotti, processi e servizi e viene sottoposto ad un periodo di verifica della validità (da www.uni.com).

Si assume pertanto che tale documento normativo possa subire, anche in tempi (relativamente) brevi, una revisione e un aggiornamento in base alle esperienze maturate nel periodo di applicazione dalla sua emanazione ad oggi.

NOMENCLATURA

d_s = spessore dello strato isolante dell'accumulo [m],
$f_{l,W,d}$ = coefficiente di perdita del sottosistema di distribuzione dell'ACS [-],
F1 = fattore di correzione dovuto al sovradimensionamento dell'impianto[-],
k_{boll} = dispersione termica dell'accumulo [W/K],
Q_h = fabbisogno di energia dell'involucro per la climatizzazione invernale [MJ],
$Q_{H,gn,out}$ = energia in uscita dal sistema di generazione relativa al

riscaldamento [MJ],
$Q_{H,nd}$ = fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per riscaldamento [MJ],
$Q_{H,nd,adj}$ = fabbisogno totale per riscaldamento e ACS [MJ],
$Q_{l,d}$ = perdite del sottosistema di distribuzione [MJ],
$Q_{l,e}$ = perdite del sottosistema di emissione [MJ],
$Q_{l,er}$ = perdite del sottosistema di erogazione dell'ACS[MJ],
$Q_{l,gn}$ = perdite del sottosistema di generazione [MJ],
$Q_{l,rg}$ = perdite del sottosistema di regolazione [MJ],
$Q_{l,W}$ = perdite del sottosistema di accumulo [MJ],
Q_W = fabbisogno di acqua calda sanitaria [MJ],
$Q_{W,gn,out}$ = l'energia in uscita dal sistema di generazione relativa all'ACS [MJ],
S_s = superficie esterna dell'accumulo [m^2],
t = durata del mese considerato [s],
γ = rapporto apporti/perdite [-],
η_d = rendimento del sottosistema di distribuzione [-],
η_e = rendimento del sottosistema di emissione [-],
η_{er} = rendimento del sottosistema di erogazione dell' ACS [-],
η_{gn} = rendimento del sottosistema di generazione [-],
$\eta_{H,gn}$ = fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti [-],
η_{rg} = rendimento del sottosistema di regolazione [-],
θ_{ac} = temperatura ambiente del locale dell'accumulo [K],
θ_s = temperatura media nell'accumulo [K],
λ_s = conduttività dello strato isolante dell'accumulo [W/(m K)],

RIFERIMENTI NORMATIVI

1. D.M. (sviluppo economico) 26 giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.
2. D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del D.Lgs 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia
3. UNI/TS 11300-1 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, 2008
4. UNI/TS 11300-2 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, 2008
5. UNI EN ISO 13789 Prestazione termica degli edifici - Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione - Metodo di calcolo, 2008
6. UNI EN ISO 13370 Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo, 2008
7. UNI EN ISO 13790 Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, 2008
8. UNI EN ISO 6946 Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo, 2008
9. Decreto ministeriale (sviluppo economico) 26 giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.

LA CERTIFICAZIONE DI SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEGLI EDIFICI DELLA REGIONE UMBRIA

Dott. Giancarlo Marchetti[1], Ing. Massimiliano Bagagli[2]

[1]ARPA Umbria (Agenzia Regionale Per la Protezione Ambientale dell'Umbria) Direttore Unità Operativa Tecnica,
[2]ARPA Umbria (Agenzia Regionale Per la Protezione Ambientale dell'Umbria) Servizio VAS e Reporting Ambientale

SOMMARIO

Gran parte dello stock edilizio residenziale è anteriore alla promulgazione delle norme sul risparmio energetico; generalmente si tratta di costruzioni scarsamente isolate con conseguenze sui consumi e sul benessere indoor. Inoltre le pratiche costruttive adottate raramente hanno fatto ricorso ai principi dello sviluppo sostenibile e della tutela della salute dell'uomo.

La Regione Umbria con la L.R. 17/08 introduce alcuni requisiti obbligatori nel processo edilizio sull'utilizzo di materiali biocompatibili e sul miglioramento delle prestazioni energetiche. Inoltre la legge istituisce, prima in Italia, la Certificazione di Sostenibilità Ambientale degli Edifici. La Certificazione fornisce una sintetica valutazione delle prestazioni ambientali dell'edificio attraverso un punteggio riferito al consumo di risorse, ai carichi ambientali ed alla qualità dell'ambiente interno. ARPA ha adattato il sistema di valutazione, ispirato al Protocollo ITACA, alla realtà umbra individuando 22 schede da utilizzare nel processo di certificazione. Il punteggio che ciascun edificio raggiunge viene poi tradotto in una classe di merito. La versione umbra del "Piano Casa", la L.R. 13/09, ha legato al raggiungimento di determinate classi della Certificazione l'accesso ai bonus volumetrici previsti.

ARPA intende presentare i contenuti essenziali della certificazione, proponendo una carrellata dei criteri che portano alla definizione delle classi di merito, e quantificare i risultati raggiunti.

LA BASE NORMATIVA

Negli ultimi anni si susseguono le iniziative che puntano ad aumentare il grado di sostenibilità ambientale del settore residenziale; il fine ultimo è quello di ridurre le emissioni in atmosfera di gas climalteranti in ottemperanza al Protocollo di Kyoto ed a tutte le norme scaturite dalla sua ratifica. Le varie azioni messe in campo vertono sulla produzione di energia da fonte rinnovabile, sulla produzione e sull'impiego di materiali provenienti da fonti rinnovabili e sul miglioramento dell'efficienza energetica.

Relativamente al campo edilizio la quasi totalità dello stock abitativo edilizio residenziale risale a prima della promulgazione delle norme sul risparmio energetico che sono invece oggi presenti nel panorama normativo comunitario e nazionale; perciò nella maggioranza dei casi ci si trova di fronte a costruzioni che disperdono gran parte del calore nella stagione invernale e che non ne ostacolano il passaggio in estate con conseguenze importanti sui consumi e sulle condizioni di benessere interne agli edifici. Inoltre le pratiche costruttive generalmente adottate hanno fatto sinora scarso ricorso a quelle metodiche oggi genericamente definite di edilizia ecologica, orientate secondo i criteri di sviluppo sostenibile e di tutela della salute dell'uomo.

La Regione Umbria con la Legge Regionale 17/08 intitolata "Norme in materia di sostenibilità ambientale degli interventi urbanistici ed edilizi" ha inteso riqualificare l'attività edilizia attraverso l'introduzione di pratiche biocompatibili.

La L.R. 17/08 ha introdotto importanti requisiti obbligatori di sostenibilità nel processo edilizio, rivolti alla salvaguardia della risorsa idrica, alla permeabilità dei suoli, alla tutela delle falde acquifere sotterrane da agenti inquinanti ed al miglioramento delle prestazioni energetiche dei fabbricati. Le nuove costruzioni dovranno essere dotate di vasche di accumulo delle acque piovane per il loro riutilizzo in ambiti compatibili, riducendo così il consumo di acqua potabile. Saranno dotate di sistemi sia per la produzione di acqua calda sanitaria che di energia elettrica e dovranno essere posizionate in modo da ottimizzare l'esposizione e l'apporto di energia solare. Le aree di pertinenza dovranno garantire elevati standard di permeabilità del suolo ed i parcheggi, sia pubblici che privati, dovranno essere dotati di sistemi per evitare la dispersione di oli e altre sostanze inquinanti nel sottosuolo. Inoltre attraverso la Legge la Regione istituisce, prima in Italia, la Certificazione di Sostenibilità Ambientale degli Edifici.

LA CERTIFICAZIONE DI SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEGLI EDIFICI

La Certificazione fornisce una sintetica valutazione delle prestazioni ambientali dell'edificio formulata attraverso un punteggio riferite ai seguenti requisiti:

a) la qualità del sito;
b) il consumo di risorse;
c) i carichi ambientali;
d) la qualità dell'ambiente interno;
e) la qualità del servizio.

Il sistema di valutazione è ispirato al protocollo ITACA (Istituto per l'Innovazione e la Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale)che è uno strumento di valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici composto da 47 criteri redatti dal Comitato Tecnico istituito a tale scopo e formato dai rappresentanti delle Regioni del gruppo di lavoro

interregionale in materia di Bioedilizia in collaborazione iiSBE Italia e con il supporto tecnico scientifico di ITC CNR e dell'Università Politecnica delle Marche ed è stato sviluppato a partire dalla metodologia del GBC (Green Building Challenge) tenendo conto della sua evoluzione e aggiornamento (Sustainable building Challenge SBC).

ARPA Umbria, in collaborazione con la Regione Umbria, sin dall'agosto 2008 ha iniziato un lavoro di adattamento e di revisione delle schede del Protocollo ITACA alla realtà umbra. Si è arrivati così ad individuare un pacchetto di 22 schede da utilizzare nel processo di certificazione. Avendo come compito quello di mettere a disposizione del pubblico uno strumento di lavoro affidabile, rigoroso e semplice da usare la linea seguita, nella fase di adattamento delle schede originali, è stata quella di favorire l'applicabilità delle schede da parte degli addetti ai lavori senza perdere la capacità di analisi delle caratteristiche dell'edificio proprie della versione originale del protocollo. Il processo che ha portato alla versione finale delle schede ha comportato alcune fasi che sono riassumibili come:

1. Selezione di un corpus di 22 schede dalle 47 originali (che sono in seguito diventate 49) che meglio rappresentano le peculiarità regionali dell'attività edificatoria e che interpretano le politiche regionali nella maniera più fedele;
2. Semplificazione delle schede originali rivedendo il lay-out, adattando i metodi di calcolo e gli indicatori che valutano la prestazione dell'edificio per ciascun criterio selezionato, aggiornando i riferimenti tecnici e normativi;
3. Individuazione di una scala di prestazione generale e la definizione delle classi di merito;
4. Test del sistema di valutazione su casi reali e contatti con gli addetti ai lavori per la risoluzione delle criticità venute alla luce.

Ciascuna scheda rappresenta una caratteristica dell'edificio che si vuole valutare, i criteri di valutazione tengono conto dei seguenti elementi:

- hanno valenza economica, sociale, ambientale di un certo rilievo;
- sono quantificabili o definibili qualitativamente, ovvero oggettivamente rispondenti a scenari prestazionali predefiniti;
- perseguono un obiettivo di largo respiro;
- hanno comprovata valenza scientifica;
- sono dotati di prerogative di pubblico interesse

Per ogni criterio l'edificio riceve un punteggio che può variare da –1 a +5, assegnato confrontando l'indicatore calcolato con i valori della scala di prestazione (benchmark) precedentemente definiti. Tale punteggio viene poi modulato dal peso del singolo criterio analizzato fino ad ottenere un punteggio finale per quel singolo criterio.

Quindi per l'assegnazione del punteggio ad un singolo criterio i passi che portano alla definizione di tale punteggio sono:

1. Calcolo o stima del valore dell'indicatore per il singolo criterio;
2. Confronto del valore dell'indicatore con la scala di prestazione ed assegnazione del punteggio compreso fra -1 e +5;
3. Modulazione del punteggio ottenuto mediante il peso attribuito al singolo criterio e punteggio finale per il singolo criterio.

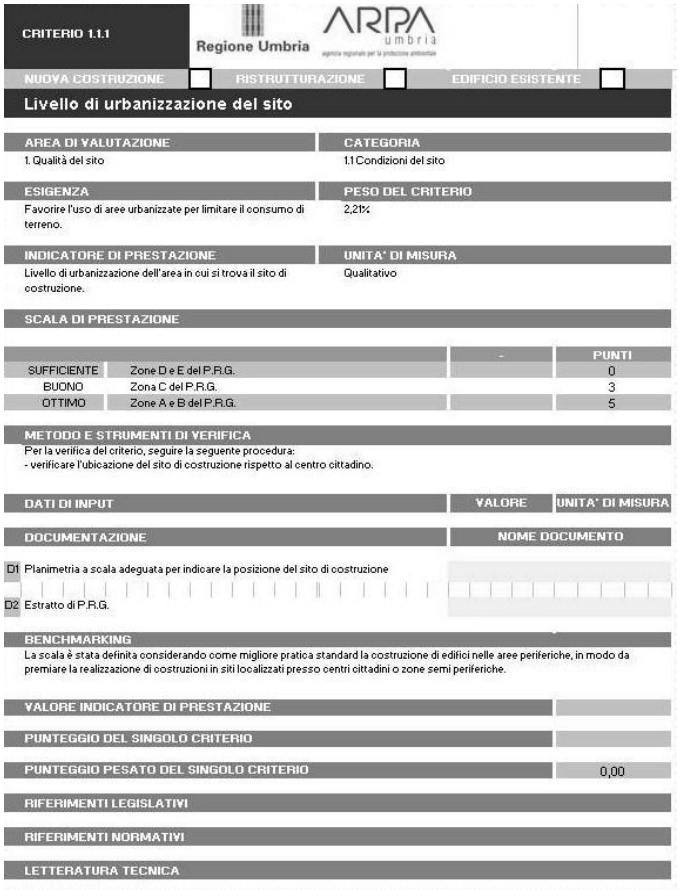
Lo zero rappresenta lo standard di riferimento riconducibile a quella che deve considerarsi come la pratica costruttiva corrente, nel rispetto delle leggi o dei regolamenti vigenti. Punteggi più alti stanno ad indicare caratteristiche dell'edificio migliori e/o più aderenti alle politiche regionali di salvaguardia e di tutela dell'ambiente. Il punteggio viene assegnato in base alle indicazioni e al metodo di verifica riportati nella scheda e fanno parte di un insieme più ampio di informazioni che le schede forniscono e che sono:

- l'esigenza, ovvero l'obiettivo di qualità ambientale che si intende perseguire;
- il peso del criterio, che rappresenta il grado d'importanza che viene assegnato al criterio rispetto all'intero strumento di valutazione
- l'indicatore di prestazione, ovvero il parametro utilizzato per valutare il livello di performance dell'edificio rispetto al criterio di valutazione e che può essere di tipo quantitativo o qualitativo;
- l'unità di misura, nel caso di indicatore di prestazione quantitativo;
- la scala di prestazione (o di benchmark), ovvero il riferimento rispetto al quale viene confrontato l'indicatore prestazionale per calcolare il punteggio del criterio di valutazione;
- il metodo e gli strumenti di verifica, che definiscono la procedura per calcolare l'indicatore di prestazione del criterio di valutazione;
- i dati di input, ovvero i dati di cui è necessario disporre per il calcolo e/o la verifica dell'indicatore prestazionale;
- la documentazione, in cui vengono specificati i documenti (o stralci di documenti) da cui sono stati estratti i dati di input;
- il benchmarking, che specifica la metodologia adottata per la definizione dei benchmark;
- i riferimenti legislativi, ovvero le disposizioni legislative di riferimento a carattere cogente o rientranti nella prassi progettuale;
- i riferimenti normativi, ovvero sono le normative tecniche di riferimento utilizzate per determinare le scale di prestazione e le metodologie di verifica;
- la letteratura tecnica, ovvero i riferimenti tecnici referenziati utilizzati per determinare le scale di prestazione e le metodologie di verifica;

Il lay-out finale è quello riportato in Figura 1 che, con le ovvie differenze tra le varie schede, presenta tutti i campi informativi elencati in precedenza:

Come accennato in precedenza ciascun criterio riceve un punteggio che viene poi pesato per un coefficiente prestabilito e determinato dall'importanza che tale criterio riveste all'interno del sistema di valutazione complessivo.

In Tabella 1 sono elencate le schede divise per area di valutazione e viene riportato il peso complessivo di ciascuna scheda.



CRITERIO 1.1.1

Regione Umbria — ARPA umbria

NUOVA COSTRUZIONE ☐ RISTRUTTURAZIONE ☐ EDIFICIO ESISTENTE ☐

Livello di urbanizzazione del sito

AREA DI VALUTAZIONE	CATEGORIA
1. Qualità del sito	1.1 Condizioni del sito

ESIGENZA	PESO DEL CRITERIO
Favorire l'uso di aree urbanizzate per limitare il consumo di terreno.	2,21%

INDICATORE DI PRESTAZIONE	UNITA' DI MISURA
Livello di urbanizzazione dell'area in cui si trova il sito di costruzione.	Qualitativo

SCALA DI PRESTAZIONE

		-	PUNTI
SUFFICIENTE	Zone D e E del P.R.G.		0
BUONO	Zona C del P.R.G.		3
OTTIMO	Zone A e B del P.R.G.		5

METODO E STRUMENTI DI VERIFICA

Per la verifica del criterio, seguire la seguente procedura:
- verificare l'ubicazione del sito di costruzione rispetto al centro cittadino.

DATI DI INPUT	VALORE	UNITA' DI MISURA

DOCUMENTAZIONE	NOME DOCUMENTO
D1 Planimetria a scala adeguata per indicare la posizione del sito di costruzione	
D2 Estratto di P.R.G.	

BENCHMARKING

La scala è stata definita considerando come migliore pratica standard la costruzione di edifici nelle aree periferiche, in modo da premiare la realizzazione di costruzioni in siti localizzati presso centri cittadini o zone semi periferiche.

VALORE INDICATORE DI PRESTAZIONE	
PUNTEGGIO DEL SINGOLO CRITERIO	
PUNTEGGIO PESATO DEL SINGOLO CRITERIO	0,00

RIFERIMENTI LEGISLATIVI

RIFERIMENTI NORMATIVI

LETTERATURA TECNICA

Figura 1: Esempio di scheda

Tabella 1: Elenco dei criteri e relativi pesi

1) QUALITA' DEL SITO - si analizza l'edificio nel suo contesto ambientale, inteso come benessere e comfort dato dall'esistenza o meno di servizi presenti nel luogo di edificazione; tre sono le schede tecniche di verifica:		
1.1 Condizioni del sito		
1.1.1	Livello di urbanizzazione del sito	2,21%
1.2 Accessibilità ai servizi		
1.2.1	Accessibilità al trasporto pubblico	2,79%
1.2.2	Distanza da attività culturali e commerciali	2,79%
2) CONSUMO DI RISORSE – questa sezione permette di analizzare l'edificio dal punto di vista energetico e del consumo di materiali e di acqua. Le prime sei schede quantificano la richiesta di energia primaria durante tutto il ciclo di vita dell'edificio, vi sono poi tre schede che valutano i materiali utilizzati ed infine una scheda che stima la riduzione dei consumi di acqua potabile:		
2.1 Energia primaria non rinnovabile richiesta durante il ciclo di vita		
2.1.1	Trasmittanza termica dell'involucro edilizio	6,17%
2.1.2	Energia primaria per il riscaldamento	6,17%
2.1.3	Controllo della radiazione solare	6,17%
2.1.4	Energia netta per il raffrescamento	6,17%
2.2 Energia da fonti rinnovabili		
2.2.1	Energia termica per ACS	6,17%
2.2.2	Energia elettrica	6,17%
2.3 Materiali eco-compatibili		
2.3.1	Materiali da fonti rinnovabili	5,28%
2.3.2	Materiali riciclabili/recuperabili	4,28%
2.3.3	Materiali locali per finiture	2,28%
2.4 Acqua potabile		
2.4.1	Acqua potabile per usi indoor	5,27%
3) CARICHI AMBIENTALI – in questa sezione si analizza l'incidenza sull'ambiente dell'esercizio usuale dell'edificio da valutare. Tre sono le schede di verifica:		
3.1 Emissioni di CO_2 equivalente		
3.1.1	Emissioni previste in fase operativa	6,12%
3.2 Acque reflue		
3.2.1	Acque meteoriche captate e stoccate	5,68%
3.2.2	Permeabilità del suolo	5,32%
4) QUALITA' AMBIENTALE INDOOR - per mezzo di quattro schede di valutazione viene valutato il benessere interno degli edifici:		
4.1 Ventilazione		
4.1.1	Ventilazione	3,94%
4.2 Benessere termoigrometrico		
4.2.1	Temperatura dell'aria	3,94%
4.3 Benessere visivo		
4.3.1	Illuminazione naturale	3,94%
4.4 Benessere acustico		
4.4.1	Isolamento acustico involucro edilizio	3,94%
5) QUALITA' DEL SERVIZIO – in questa sezione si valutano le soluzioni per il mantenimento dell'edificio in fase operativa e la dotazione dell'edificio relativamente ai cablaggi:		
5.1 Mantenimento delle prestazioni in fase operativa		
5.1.1	Disponibilità della documentazione tecnica degli edifici	2,60%
5.2 Domotica		
5.2.1	Qualità del sistema di cablatura	2,60%

Si nota come le schede relative alla parte 2) CONSUMO DI RISORSE rappresentino la parte più importante della valutazione ed in particolare ai criteri sul consumo/risparmio/produzione di energia viene attribuito il peso maggiore nell'ambito dell'intero sistema di certificazione. Nonostante l'importanza data all'aspetto energetico esso non è predominante nella quantificazione del punteggio totale che è possibile conseguire; per raggiungere una classe alta di merito non ci si può limitare a porre l'attenzione solo sugli aspetti energetici e questo è evidenziato dai pesi attribuiti alle altre aree di valutazione come, ad esempio, le schede concernenti la parte 3) CARICHI

AMBIENTALI.

In pratica un edificio viene considerato tanto più sostenibile quanto più è efficiente dal punto di vista energetico, non consuma grandi quantità di acqua, e conseguentemente ha ridotte emissioni sulle principali matrici ambientali, è costruito con materiali biocompatibili, è confortevole e ben dotato dal punto di vista impiantistico ed è posto nelle vicinanze dei principali servizi di trasporto pubblico ed attività commerciali e culturali.

La somma dei punteggi ottenuti nelle cinque aree di valutazione, determina il punteggio finale del fabbricato, che, espresso in centesimi, determina l'appartenenza dello stesso in una delle cinque classi di certificazione riportate in Tabella 2.

Tabella 2: Classi di merito e punteggi relativi

PUNTEGGIO DI VALUTAZIONE	DEFINIZIONE CLASSE
85 -100	A+
70 - <85	A
55 - <70	B
40 - <55	C
< 40	D

Un edificio in classe D non ottiene il Certificato di Sostenibilità Ambientale.

La Certificazione di Sostenibilità Ambientale è rilasciata da ARPA Umbria, ha validità di 10 anni rinnovabili ed è affissa all'edificio con la relativa definizione della classe di appartenenza ed il punteggio di valutazione. Tutta la documentazione da presentare per il rilascio della Certificazione di Sostenibilità Ambientale deve essere sottoscritta da un tecnico abilitato.

Il Certificato rilasciato ha l'aspetto riportato in Figura 2.

Al fine di favorire una stima delle caratteristiche di qualità ambientale di un fabbricato precendentemente alla realizzazione dell'intervento edilizio, il progetto può essere sottoposto ad ARPA Umbria, una sola volta per ciascun edificio, per una Valutazione preliminare della Sostenibiltà Ambientale; si intende con ciò offrire agli addetti ai lavori la possibilità di verificare la rispondenza delle scelte progettuali ai criteri della certificazione quando è ancora possibile operare delle modifiche nella fase realizzativa.

LO SVILUPPO DELLA CERTIFICAZIONE

L'art. 4 della L.R. 17/08 definisce il Disciplinare Tecnico che si configura come lo strumento di valutazione delle prestazioni ambientali degli edifici residenziali, finalizzato al rilascio della Certificazione di Sostenibilità Ambientale degli Edifici. Il Disciplinare definisce una griglia di classificazione degli edifici residenziali con un punteggio associato a ciascun fabbricato, tradotto con le classi di merito, e stabilisce la soglia minima sotto la quale non è previsto il rilascio della Certificazione.

La L.R. 17/08 impone l'obbligatorietà della Certificazione di Sostenibilità Ambientale degli Edifici nel caso di realizzazione di edifici pubblici da parte della Regione, di Enti, di Agenzie, Società Regionali, Province, Comuni e loro forme associative, nonché per edifici di edilizia residenziale di proprietà delle Agenzie Territoriali per l'Edilizia Residenziale (ATER) mentre è attivabile dai cittadini su base volontaria.

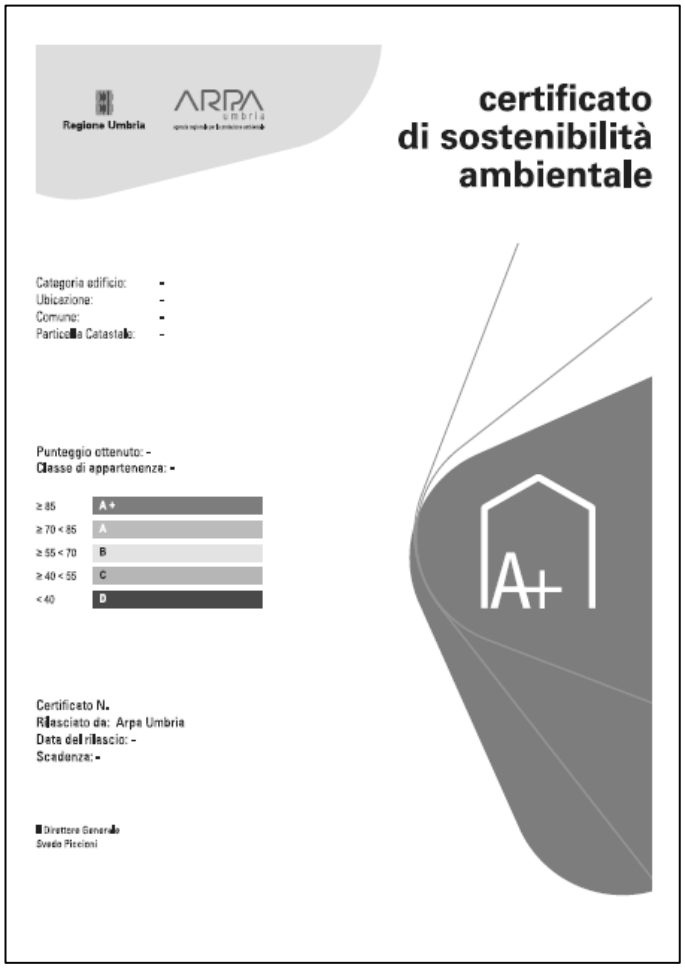


Figura 2: Esempio di Certificato

La prima versione del Disciplinare Tecnico è stata pubblicata con la D.G.R. n. 581 del 27/04/2009 ma alla luce dell'approvazione della L.R. 13/09 (la versione umbra del "Piano Casa"), in cui viene legata la possibilità di usufruire, per determinate categorie di edifici, dei bonus volumetrici previsti dal "Piano Casa" al raggiungimento almeno delle Classi A o B della Certificazione di Sostenibilità Ambientale degli Edifici e della pubblicazione dei decreti attuativi della Certificazione Energetica (D.P.R. 59/09 e D.M. 26/06/09) si è evidenziata la necessità di una rivisitazione del sistema di valutazione. Pertanto la Regione Umbria ha emanato una nuova versione del Disciplinare Tecnico adottato con D.G.R. n. 1322 del 28/09/2009.

Notevole impulso a tutto il processo di certificazione è stato dato dagli Artt. 32 e 35 della L.R. 13/09 che prevedono che i nuovi edifici o gli interventi di recupero che vogliono avvalersi del bonus edificatorio previsto debbano preliminarmente dotarsi della Valutazione Preliminare della Sostenibiltà Ambientale che assegni al progetto una fra le Classi A o B (l'entità del bonus edificatorio dipende dalla classe di merito raggiunta) che deve poi essere confermata, una volta completati i lavori, attraverso la Certificazione di Sostenibilità Ambientale degli Edifici.

Il processo di incentivazione della Certificazione è stato ulteriormente portato avanti da alcuni recenti bandi regionali in tema di bioarchitettura che erogano finanziamenti per la costruzione di edifici dagli elevati standard di sostenibilità ambientale e che prevedono, come requisito per la partecipazione, la Valutazione Preliminare della Sostenibiltà Ambientale del progetto e la successiva Certificazione dei fabbricati realizzati. Numerosi sono poi i comuni umbri che

hanno inserito nei Regolamenti Edilizi la Certificazione come condizione per il rilascio dei permessi.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La Certificazione prende lo spunto dal protocollo ITACA ma se ne differenzia per il lavoro di adattamento alla realtà locale, di semplificazione e di adeguamento alle più recenti norme che ha permesso di mantenerne la capacità di analisi dei vari aspetti ambientali di un edificio.

La Certificazione di Sostenibilità Ambientale degli Edifici rappresenta una svolta per tutta l'attività edilizia regionale e definisce degli standard su cui dovranno basarsi i nuovi edifici e determinati interventi di ristrutturazione dell'esistente. Introdotta dalla L.R. 17/08 come processo obbligatorio strettamente per le costruzioni promosse dagli Enti Pubblici e volontario per le iniziative private si accinge a diventare il principale strumento di valutazione grazie all'accoppiamento con le norme relative al "Piano Casa", con i più recenti bandi regionali e con le disposizioni previste nelle revisioni operate in numerosi regolamenti edilizi comunali.

VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DELL'ARCHITETTURA E *GREEN URBAN CONSERVATION*

Domenico Enrico Massimo[1], Antonio Barbalace[1]

[1] <Sustainability University Laboratory Section>; <PAU gis University Laboratory>
Dipartimento #1 Patrimonio Architettonico e Urbanistico (PAU)
Università degli Studi *Mediterranea* di Reggio Calabria, 25 Via Melissari, 89124 Reggio Calabria
Email: massimo@unirc.it; paugis@unirc.it; Correspondence Email: massimo04@gmail.com
Phone 39.360.997513. Office 39.0965.385228. Fax 39.0965.385222

SOMMARIO

L'obiettivo generale della ricerca è di prefigurare e valutare quantitativamente correlazioni e sinergie tra interventi di riqualificazione urbana ed efficienza energetica delle architetture, inquadrandole all'interno di una strategia energetica sostenibile che introduce la generalizzazione della eco-conservazione a scala urbana configurando la nuova <*Green Urban Conservation*>. La ricerca parte da interventi di miglioramento climatico-energetico dei singoli organismi architettonici e poi ne simula e ne prefigura la generalizzazione a scala urbana, sviluppando un Caso di Studio di <quartiere sostenibile>, ovvero un <distretto energetico urbano>. Il Caso di Studio struttura e approfondisce sistematiche azioni di *Green Conservation* a scala urbana con cui si ottiene il risultato di 30 milioni di kWh di energia risparmiata nell'intero quartiere in un anno, per effetto di interventi che integrano la riqualificazione urbana e la conservazione architettonica sostenibile con interessanti tempi di ritorno dell'investimento. Domenico Enrico MASSIMO ha impostato la ricerca e ha redatto i paragrafi 1, 2, 3. Antonino BARBALACE ha costruito il Geodatabase, ha coordinato i calcoli e ha redatto i paragrafi 4, 5.

General aim of the research it to integrate the potential relationship between urban rehabilitation interventions and building energy efficiency within a strategy introducing Green Urban Conservation. Research begins with interventions for single buildings and then generalizes them at urban scale. A Case Study simulates a <sustainable neighbourhood>, i.e. an <urban energy district>. Case Study investigates and appraises systematic actions of Green Urban Conservation which make it possible an energy saving of 30 millions of kWh, in the whole neighbourhood per year, as positive effect of sustainable urban rehabilitation interventions.

01. INTRODUZIONE

L'Unione Europea con la sua strategia spaziale ha indirizzato gli Stati e i territori alla salvezza del suolo non urbanizzato e alla contestuale valorizzazione e ri-abitazione degli insediamenti storicizzati attraverso: interventi caratterizzati da sostenibilità ecologico-culturale sull'esteso patrimonio abitativo esistente; riqualificazione energetica di edilizia e architettura; conseguente risparmio energetico; ricorso complementare a fonti energetiche rinnovabili; produzione il più possibile decentrata protesa verso l'autonomia energetica di gruppi e comunità locali.

Obiettivo generale della ricerca è di prefigurare e quantificare le potenziali correlazioni instaurabili tra interventi di riqualificazione a scala urbana ed efficienza energetica a scala di edifici, inquadrandole all'interno di una strategia di sostenibilità e in *framework* GIS.

La ricerca parte dagli organismi architettonici e generalizza poi l'intervento, sviluppando un Caso di Studio a scala urbana di <quartiere sostenibile> ovvero un <distretto energetico urbano>, configurabile quale programma di conservazione urbana sostenibile.

Nel Caso di Studio, in un'area denominata Quartiere Latino, concernente la strutturazione di un programma per un quartiere sostenibile, sono approfondite complementari azioni di conservazione e relativi impatti: risparmio energetico mediante isolamento termico; passivizzazione e igro-regolazione degli edifici; conseguente riduzione alla radice dei consumi di energia sia per il riscaldamento che per il raffrescamento degli organismi architettonici esistenti; produzione decentrata di energia mediante solare fotovoltaico e termico; più recenti innovazioni scientifiche che finalmente sembrano consentire anche l'alimentazione del condizionamento estivo con il solare, per mezzo tra l'altro del *solar cooling*; valutazione dei costi globali *over-time*, e dei risparmi fisici, ecologici e monetari conseguibili.

L'investimento comporta un *premium* monetario iniziale che è dovuto al maggiore costo della conservazione sostenibile, rispetto alla comune ordinaria manutenzione, per la più elevata qualità delle tecniche e dei materiali bio-ecologici. Le prime conclusioni, generalizzate all'intero quartiere sostenibile, mostrano ragionevoli e interessanti tempi di ritorno di tale maggiore costo iniziale. Esso è neutralizzato dalla drammatica riduzione dei costi di gestione energetica annuale dovuta alla corrispondente alta efficienza energetica acquisita dall'organismo architettonico termo-climaticamente riqualificato. I risultati ottenuti quantificano in oltre 30 milioni di kWh l'energia risparmiabile nell'intero quartiere in un anno, proprio per effetto di specifici interventi di conservazione urbana sostenibile.

02. CONTENUTI E OBIETTIVI SPECIFICI DELLA RICERCA

La ricerca concerne la sostenibilità a scala urbana ovvero la *Green Urban Conservation*, e in particolare la tematica del sempre crescente consumo di energia negli insediamenti antropici, specie nelle aree di concentrazione urbana.

La ricerca si interroga sulle possibili soluzioni globali al problema dell'eccessivo e inefficiente consumo di energia nelle costruzioni, specie per il crescente tumultuoso ricorso al condizionamento estivo degli edifici.

La ricerca ha avviato l'impostazione di una metodologia di valutazione energetica integrata e speditiva a scala urbana partendo da singoli edifici, con il supporto dei sistemi informativi geografici, per: la stima delle risorse da impiegare per la riqualificazione energetica ovvero per la passivizzazione degli edifici esistenti; la valutazione del fabbisogno energetico degli

stessi edifici, *ex-ante* ed *ex-post*; e del risparmio fisico (risorse) e dei benefici ecologici prodotti dagli interventi.

Nella riqualificazione energetica, prevista quale primo obiettivo, si progetta la passivizzazione utilizzando materiali termo-coibenti come la calce idraulica totalmente naturale con silici naturali espanse e il sughero ecologico lis. Rispettivamente per la coibentazione delle facciate il primo, e la ventilazione e l'isolamento di tetti, coperture e terrazze il secondo. Il primo obiettivo (riqualificazione) è coordinato con il secondo cioè con l'utilizzo di tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili come quella solare sia per il riscaldamento invernale, sia per il raffrescamento estivo.

Scopo finale cui mira la ricerca è la generalizzazione alla scala di interi quartieri urbani dei risultati puntuali al fine di stimare i seguenti aspetti specifici della strategia: conoscere i costi totali degli interventi fisici di riqualificazione energetica a scala urbana; calcolare i kWh necessari per la gestione energetica degli stessi in presenza o assenza di riqualificazione (tecnica di comparazione di scenari alternativi); stimare i chilogrammi di mancate emissioni di CO_2 dovuti alla riqualificazione; valutare i costi della CO_2 e all'inverso il valore anche economico delle mancate emissioni. La valutazione degli interventi è svolta con la comparazione di scenari alternativi: senza intervento; con intervento sostenibile; con intervento non sostenibile.

Per il raggiungimento di tali obiettivi quantitativi, la strategia di ricerca è stata articolata come di seguito descritto.

03. STRATEGIA DELLA RICERCA

Punto di partenza della ricerca è il *data collection* e la progettazione del sistema informativo per l'acquisizione e successiva elaborazione-gestione delle informazioni.

Elemento caratteristico della ricerca è un Caso di Studio operativo sviluppato nel Quartiere Latino di Reggio Calabria così definito perché sede di Facoltà e Studenti Universitari.

Segue la rappresentazione dell'edificato del Quartiere Latino che permette di conoscerne l'entità urbana dal punto di vista fisico quantitativo e con livelli sempre più approfonditi di dettagli: superficie edificata; metri cubi costruiti; metri quadrati di facciate; metri quadrati di coperture; altro.

Segue la tipologizzazione, che articola l'edificato in base alla tipologia costruttiva.

Con il campionamento si scelgono due (o più) edifici campione per ciascuna tipologia, per i quali si progettano e si calcolano interventi cantierabili e si stimano analiticamente i diversi effetti e costi per i diversi scenari alternativi.

Con la parametrizzazione, si stimano, a partire dai citati edifici campione, i dati parametrici relativi sia ai costi di riqualificazione bio-architettonica e sia al fabbisogno energetico nei diversi scenari alternativi.

Con la definita generalizzazione, si derivano gli ordini di grandezza totali. I singoli dati parametrici sia di costo (□) e sia di energia (kWh) sono moltiplicati per i dati fisici quantitativi dell'intero quartiere. Si conoscono in tal modo i costi di riqualificazione e di gestione energetica sia a livello di singolo edificio e sia, grazie alla generalizzazione dei risultati, alla inaudita scala di area urbana, di quartiere, e di intera città.

04. METODOLOGIA DELLA RICERCA E CONTENUTI

I progressivi livelli di approfondimento della ricerca si sono concretizzati nelle fasi di seguito descritte.

Fase 1. Geodatabase design

La Fase 1 è di progettazione del Geodatabase ovvero delle *feature classes, tables, fields, relationship classes, raster datasets, subtypes, topologies, domains*. È comprensiva del *data collection* (ovvero dell'acquisizione di preziose basi cartografiche) e della creazione del modello tridimensionale del terreno dell'Area di Studio. Lo specifico Geodatabase in ambiente ArcGIS contiene i dati che sintetizzano a scala urbana sia la modellazione e sia le informazioni alfanumeriche.

Fase 2. Prima modellazione degli edifici a scala urbana

Con la modellazione urbana tridimensionale gli edifici sono costruiti come parallelepipedi estrudendo i *footprint*, a partire da ArcGIS e Google SketchUp, e valorizzando cartografia e iconografie storiche della città. I volumi sono calcolati moltiplicando l'area d'ingombro per l'altezza dei singoli corpi di fabbrica (ArcGIS). Particolare impegno e rilievo assume la modellazione tridimensionale delle coperture (Google SketchUp). Infatti, ai parallelepipedi sono sovrapposte le coperture e calcolati i volumi (metri cubi) mediante l'utilizzo di *allied software*. Ne discendono il calcolo e l'inserimento nel sistema informativo, inizialmente strutturato, dei dati fisici degli edifici relativi a metri quadri costruiti, metri cubi, altezze degli edifici, altro.

Fase 3. Interventi. Specificazioni

Nella città esistente durante i lavori di rifacimento delle facciate e di coibentazione dei terrazzi, si eseguono periodiche sostituzioni di due parti chiave nella protezione degli edifici definiti "strati di sacrificio" perché fisiologicamente soggetti a integrale sostituzione nei periodici interventi di manutenzione straordinaria: gli intonaci esterni; le coibentazioni delle coperture piane (cosiddette terrazze) e inclinate (tetti). La strategia interviene proprio in occasione degli interventi di rifacimento di impermeabilizzazioni e intonaci esterni sostituendone i materiali chiave con altri maggiormente coibenti per ottimizzare i comportamenti climatici degli edifici.

Fase 4. Tipologizzazione

Nell'ottica di applicazioni a scala di intera città, è progettata una fase di tipologizzazione in cui gli edifici sono suddivisi in base alle tipologie costruttive prevalenti. Tale fase permetterà poi di conoscere in tempi brevi l'ordine di grandezza degli interventi a scala urbana attraverso le successive parametrizzazione e generalizzazione dei risultati. All'interno dell'Area di Studio sono state individuate le seguenti quattro tipologie costruttive prevalenti.

Tabella 1: Tipologie costruttive prevalenti nell'Area di Studio

Tipologia (LIB)	1	Edifici della Ricostruzione post-terremoto dell'Ente Edilizio o di privati, con architetture neoclassiche, storiciste, Liberty, del periodo 1908-1939
Tipologia (RAZ)	2	Edifici razionalisti degli anni 30-40.
Tipologia (CON)	3	Edilizia speculativa multi-piano, spesso di sostituzione del Liberty, successiva al Regio Decreto 22.11.1937, n. 2015, con struttura intelaiata in calcestruzzo armato, senza muratura collaborante.
Tipologia 4 (TIP)		Tutte le altre tipologie, non rientranti nelle precedenti tipologie.

Fase 5. Valutazione complessa a scala di edificio

Per ciascuna tipologia sono stati selezionati più edifici campione rappresentativi. Per questi sono stati effettuati: 1) più accurati rilevamenti geometrici; 2) raccolta di atti d'archivio e altra documentazione; 3) analisi dei degradi, dissesti, e bisogni di intervento; 4) simulazioni dei differenti scenari alternativi di intervento; 5) valutazione dei costi dettagliati degli interventi di riqualificazione, nei differenti alternativi scenari, mediante Analisi dei Fattori Elementari; 6) stima di comportamento, fabbisogno ed efficienza energetica, nei diversi alternativi scenari, con l'utilizzo di più comparativi *software* specifici; 7) calcoli dei costi di gestione energetica senza intervento; 8) calcoli dei costi di gestione energetica nel caso di intervento sostenibile; 9) calcoli dei globali differenziali energetici e monetari.

Relativamente al fabbisogno energetico, utilizzando più approcci e relativi *software* comparati di calcolo fisico tecnico sono derivati i parametri nei due scenari dello stato di fatto e sostenibile dopo la riqualificazione energetica. Per ogni tipologia sono calcolati, quali *proxies*, i fabbisogni energetici a m^2 per il riscaldamento invernale. I singoli importi parametrici espressi in □\um moltiplicati per le quantità fisiche dei singoli edifici consentono di conoscere l'entità della spesa per la passivizzazione. Con la stessa procedura si quantificano le uscite per il riscaldamento invernale. I risultati quantificano risorse fisiche e costi monetari sia per l'intervento edilizio iniziale e sia per la gestione energetica permanente della specifica tipologia.

Fase 6. Modellazione foto-realistica dei fabbricati campione

A partire da edifici campione (significativi per tipologia costruttiva), una volta noti gli ordini di grandezza degli interventi di riqualificazione energetica, la ricerca ha intravisto la possibilità di migliorare i dati a disposizione mediante approfondimento dei primi risultati ottenuti nelle precedenti fasi. In prima istanza è stata elaborata una più accurata rappresentazione dell'edificato al fine di avere dei dati quantitativi più precisi e poter affinare la prima conseguente stima, mediante i seguenti passaggi: rilievo speditivo sul campo; campagna fotografica; modellazione 3D dei singoli edifici in modo più dettagliato (Google SketchUp); foto *texturing* degli edifici (Adobe Photoshop; Google SketchUp); importazione in GIS (ArcGIS, Google SketchUp) nel Geodatabase dei singoli *building* come *Feature Class* di tipo *multipatch*; allineamento dei campi della *Feature Class* di tipo *multipatch* con i campi della Feature Class di tipo *polygon* della precedente Fase; *data entry* dei dati quantitativi. Si ottengono risultati approfonditi e con una forte verifica di dettaglio.

Fase 7. <Manuale di fabbricato per la realizzazione della Sostenibilità Urbana>

L'obiettivo è la creazione di una manualistica per la sostenibilità urbana a partire dagli edifici campione che sono rappresentati in dettaglio grazie ai rilievi diretti manuali finalizzati al miglioramento della stima analitica dei costi e del calcolo del fabbisogno energetico.

La stima dei costi degli interventi migliora grazie alla migliore qualità dei dati. Dettagliato è il rilevamento (AutoCad; Google SketchUp; ArcGIS; PAUgis *software*) così come il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici (Termo4; Docet; altri).

L'*output* è un libretto di fabbricato sperimentale ovvero un futuro <Manuale di fabbricato per la realizzazione della Sostenibilità Urbana> di ogni singolo edificio. <Manuale> quale base per la futura assistenza sia tecnica che creditizia che si offre a singoli possessori di unità, a proprietari di immobili, a condomini, a soggetti immobiliari privati e pubblici. Uno dei punti di forza è proprio in questa decentrata assistenza realizzata attraverso il <Manuale > e la sua puntuale traduzione isolato per isolato, a partire dagli isolati campione, valutando gli interessanti tempi di ritorno del capitale.

Fase 8. Parametrizzazione

I dati parametrici relativi a ciascuna tipologia sono inseriti nel Geodatabase che consente di:
- quantificare per singolo edificio i costi relativi alla potenziale riqualificazione energetica;
- quantificare per singolo edificio il fabbisogno energetico relativo allo stato di fatto e ai diversi scenari;
- quantificare a scala di quartiere sostenibile i costi di riqualificazione energetica;
- quantificare a scala di quartiere sostenibile il risparmio energetico annuo;
- quantificare a scala di quartiere sostenibile i tempi di ritorno finanziario del maggiore *premium* monetario (differenziale rispetto all'intervento dello scenario non-sostenibile) dovuto agli interventi sostenibili di passivizzazione energetica degli edifici;
- stimare la CO_2 differenziale, cioè non immessa nell'atmosfera grazie all'intervento sostenibile.

La parametrizzazione offre il grande vantaggio di poter stimare speditamente *ex-ante* l'ordine di grandezza sia dei costi di riqualificazione energetica e sia del fabbisogno energetico degli edifici negli alternativi gli scenari: dello stato di fatto; dello stato di progetto sostenibile.

La comparazione tra il fabbisogno energetico espresso in kWh dello stato di fatto, ricavato da indagini dirette, e il corrispettivo degli edifici riqualificati ha permesso di conoscere il differenziale ovvero il risparmio di energia in termini di kWh totali, in termini di □ per ibilanci delle famiglie, e non ultimo i kg di CO_2 evitati e non immessi nell'atmosfera, grazie alla riqualificazione climatica.

La metodologia permette altresì di ridurre i tempi necessari alla conoscenza approfondita e offre indicazioni alla società e alle Amministrazioni sui possibili risultati ottenibili da interventi a larga scala urbana.

Infatti, nel caso specifico della ricerca che si presenta, l'aver articolato l'edificato per tipologie costruttive, rilevando e analizzando accuratamente un numero contenuto di edifici campione e paradigmatici, ha permesso: di impegnare meno attività; di ridurre i tempi per ottenere risultati attendibili; di ridurre i costi per le analisi.

Tutti i dati raccolti, le informazioni elaborate, le analisi svolte, sono cristallizzate in modo sicuro in un sistema informativo georiferito stabile, interrogabile, flessibile e aperto.

Fase 9. Generalizzazione e valutazione a scala urbana

Per poter generalizzare i risultati a scala di isolato, quartiere, città, sono stati derivati i dati parametrici relativi agli alternativi scenari, e nello specifico dello scenario sostenibile qualificato da: rifacimento delle facciate con termo-intonaci naturali; rifacimento delle coperture con sughero in base alle due

tipologie individuate, ovvero terrazzo piano e tetto a falda con tegole.

Le analisi dell'Area di Studio hanno rilevato circa 20 cantieri l'anno per il rinnovo e rifacimento di intonaci esterni e di impermeabilizzazioni di terrazze piane e tetti: con tale ritmo, un ciclo di appena sei-otto anni sarebbe temporalmente sufficiente per rinnovare il totale dei 120 Isolati urbani del Quartiere Latino.

05. PRIMI RISULTATI E CONSIDERAZIONI

Operando la generalizzazione, si è considerato per prima la passivizzazione delle pareti verticali (con intonaci termo-coibenti a base di calce idraulica naturale con silici espanse) di almeno 400 edifici.

Si può prevedere in un ciclo di soli sei-otto anni la realizzazione di un intervento pari a 400.000 m^2 di pareti esterne (1.000 m^2 per edificio con una media di 82 m di perimetro per 12 m di altezza media).

Le pareti esterne da passivizzare con intonaco termo-coibente ammontano quindi a circa 400.000 m^2.

La quantità di 400.000 m^2 per un costo massimo di €\m^2 80 determina un potenziale investimento minimo di €50.000 per edificio e di € 32.000000 per l'intero quartiere. Una uscita ovvero una spesa che i privati recuperano sin da subito con *installments* annuali costituiti dal sostanziale risparmio di energia prima tratteggiato e quantificato.

Le terrazze da termo-coibentare e ventilare sono stimate in 180.000 m^2.

Ipotizzando la termo-coibentazione e ventilazione delle terrazze per circa 180.000 m^2 con sughero aerante termo-coibente lis per un costo di €m^2 60, si determina un potenziale investimento totale pari a € 10.800.000. Anche questa è una uscita ovvero una spesa che i privati recuperano sin da subito con il sostanziale risparmio energetico di cui si beneficiare ad intervento appena completato.

Ne consegue che il costo totale di passivizzazione del quartiere è pari a € 42.800.000 (€ 32000.000 + € 10.800.000).

I volumi totali costruiti esistenti, stimati mediante derivazione dal sistema informativo, risultano pari a circa 2.500.000 di m^3. Considerando un'altezza media per alloggio pari a 3 metri, si può in prima approssimazione quantificare la superficie edificata da gestire energeticamente nell'intero Quartiere Latino in circa 830.000 m^2.

Le analisi e simulazioni svolte a campione sulle diverse tipologie edilizie presenti hanno mostrato con riferimento allo stato attuale un fabbisogno energetico medio pari a 100 kWh\m^2. Moltiplicando tale dato parametrico per i metri quadrati totali si calcola che il fabbisogno totale per l'intero quartiere è pari a circa 83.000.000 di kWh all'anno ovvero a 83.000 MWh all'anno. Considerando un costo medio dell'energia di 0,15 €kWh si ottiene una spesa totale complessiva di gestione energetica pari a circa € 12.450.000.

Le ricerche, le osservazioni in cantiere, le sperimentazioni *ad hoc*, nonché i monitoraggi mediante *loggers* svolte sugli stessi edifici campione dove sono stati realizzati reali interventi di riqualificazione energetica sostenibile, hanno evidenziato una riduzione media del fabbisogno energetico pari al 40%.

Il fabbisogno nello scenario sostenibile è ipotizzabile che si riduca pertanto a 50.000.000 di kWh all'anno ovvero a 50.000 MWh. Sottraendo al consumo prima dell'intervento di 83.000.000 kWh quello dopo l'intervento di 50.000.000 kWh, si calcola il risparmio energetico ovvero il differenziale totale pari a 33.000.000 di kWh, ovvero a 33.000 MWh, non consumati (83.000.000 kWh - 50.000.000 kWh = 33.000.000 kWh).

Il conseguente risparmio energetico in termini monetari è di € 5.000.000 l'anno (33.000.000 kWh x 0,15 €kWh). Considerando un costo totale di passivizzazione degli edifici pari a € 42.800.000, ed un conseguente risparmio energetico in termini monetari di € 5.000.000 all'anno, il corrispondente *pay-back* è stimato in 10-11 anni, al 4% di interesse a tasso fisso.

Tabella 1: Riqualificazione energetica dell'intero Quartiere Latino. Ritorno economico dell'investimento. *Pay-back* stimato in 10-11 anni del costo di passivizzazione stimabile in € 42.800.000. Con i=4%

Anni di Vita del Progetto	*Status Quo.* Consumi €	Scenario Sostenibile. Consumi €	Coeff di attualizzazione $(1+i)^{-n}$ i=4%	Consumi. Valore attuale dello *Status Quo*	Consumi. Valore attuale dello Scenario Sostenibile	Risparmio annuo	Saldo
Anno 01	12.450.000,00	7.500.000,00	0,9615	11.970.675,00	7.211.250,00	4.759.425,00	4.759.425,00
Anno 02	12.450.000,00	7.500.000,00	0,9245	11.510.025,00	6.933.750,00	4.576.275,00	9.335.700,00
Anno 03	12.450.000,00	7.500.000,00	0,8889	11.066.805,00	6.666.750,00	4.400.055,00	13.735.755,00
Anno 04	12.450.000,00	7.500.000,00	0,8518	10.604.910,00	6.388.500,00	4.216.410,00	17.952.165,00
Anno 05	12.450.000,00	7.500.000,00	0,8219	10.232.655,00	6.164.250,00	4.068.405,00	22.020.570,00
Anno 06	12.450.000,00	7.500.000,00	0,7903	9.839.235,00	5.927.250,00	3.911.985,00	25.932.555,00
Anno 07	12.450.000,00	7.500.000,00	0,7599	9.460.755,00	5.699.250,00	3.761.505,00	29.694.060,00
Anno 08	12.450.000,00	7.500.000,00	0,7306	9.095.970,00	5.479.500,00	3.616.470,00	33.310.530,00
Anno 09	12.450.000,00	7.500.000,00	0,7025	8.746.125,00	5.268.750,00	3.477.375,00	36.787.905,00
Anno 10	12.450.000,00	7.500.000,00	0,6755	8.409.975,00	5.066.250,00	3.343.725,00	**40.131.630,00**
Anno 11	12.450.000,00	7.500.000,00	0,6495	8.086.275,00	4.871.250,00	3.215.025,00	**43.346.655,00**
Anno 12	12.450.000,00	7.500.000,00	0,6245	7.775.025,00	4.683.750,00	3.091.275,00	46.437.930,00
Anno 13	12.450.000,00	7.500.000,00	0,6005	7.476.225,00	4.503.750,00	2.972.475,00	49.410.405,00
Anno 14	12.450.000,00	7.500.000,00	0,5774	7.188.630,00	4.330.500,00	2.858.130,00	52.268.535,00
Anno 15	12.450.000,00	7.500.000,00	0,5552	6.912.240,00	4.164.000,00	2.748.240,00	55.016.775,00
Anno 16	12.450.000,00	7.500.000,00	0,5339	6.647.055,00	4.004.250,00	2.642.805,00	57.659.580,00
Anno 17	12.450.000,00	7.500.000,00	0,5133	6.390.585,00	3.849.750,00	2.540.835,00	60.200.415,00
Anno 18	12.450.000,00	7.500.000,00	0,4936	6.145.320,00	3.702.000,00	2.443.320,00	62.643.735,00
Anno 19	12.450.000,00	7.500.000,00	0,4716	5.871.420,00	3.537.000,00	2.334.420,00	64.978.155,00
Anno 20	12.450.000,00	7.500.000,00	0,4563	5.680.935,00	3.422.250,00	2.258.685,00	67.236.840,00
			Valore attuale	**169.110.840,00**	**101.874.000,00**		

Concludendo, si considera che per produrre un MWh di energia da fonte fossile sono immesse nell'atmosfera circa 255 Kg\MWh di CO_2. Un intervento a scala di quartiere, produce diversi risparmi: uno monetario di € 5.000000 l'anno, e di 33.000.000 di kWh in meno l'anno; un secondo, ancora da monetizzare, ecologico in termini di CO_2 non immessi nell'atmosfera pari a 8.415.000 Kg (8.415 tonn) di CO_2; un terzo, ancora da monetizzare, strategico di conservazione di esauribili e irriproducibili riserve minerarie fossili.

Il valore economico di tale "danno ecologico evitato" (che sarà stimato in una successiva tappa della ricerca) andrà a sommarsi al risparmio strategico conseguito, espresso solo in minima parte dalla "spesa energetica evitata". A tali prime stime preliminari andranno aggiunti gli eccezionali risparmi ottenibili sul raffrescamento estivo per effetto della igro-regolazione e termo-coibentazione dovuta alla calce idraulica naturale. Ciò nella seconda parte della ricerca che sarà pubblicata nel prossimo futuro.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. ACE3 (2000) *Energy Efficiency in Buildings*. Proceedings of the ACE3 2000. August 20-25.2000
2. Glicksman, L., Lin J. (eds) (2006) *Sustainable Urban Housing in China, Principles and Case Studies for Low-Energy Design*. Springer, Netherlands
3. Green Building Council (2003) *LEED, Green Building Rating System for Core and Shell Development*. U.S.

Environmental Protection Agency, Washington, DC, Usa
4. Green Building Workgroup (2004) *Buildings and the Environment: A Statistical Summary*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, Usa
5. IPCC (1990) *First Assessment Report*, Cambridge University Press, UK
6. IPCC (1995) *Second Assessment Report*, IPCC, Geneva, Switzerland
7. IPCC (2001) *Third Assessment Report*, Cambridge University Press, UK
8. IPCC (2007) *Fourth Assessment Report*, IPCC, Geneva, Switzerland.
9. Kats, G.H. (2003) *The Costs and Financial Benefits of Green Buildings: A Report*, California's Sustainable Building Task Force, Sacramento, California, USA
10. Massimo D. E. (2008) Stima del risparmio energetico derivante da interventi di conservazione sostenibile sul patrimonio edilizio. Caso di studio nella ricostruzione Liberty di Reggio Calabria. In: Asdrubali F. (ed) *Sviluppo sostenibile, tutela dell'ambiente e della salute umana*. Morlacchi Edizioni, Perugia: pp. 213-218. ISBN/ISSN: 978-88-6074-089-2
11. Massimo D. E., Barbalace A., Cefala R. M. (2008) GIS, Essential Tool to Foster Sustainability in Urban Conservation. Proceedings of the 28th ESRI International User Conference. *GIS: Geography in Action*. San Diego, California, Usa. August 04-08.08.2008. ESRI Press, Redlands, California, Usa. CD-Rom
12. Massimo D. E. (2009) Urbanistica solare e Solar Cooling. Sperimentazione di un <Quartiere Sostenibile> e produzione solare decentrata per il raffrescamento estivo. In: Atti del 4° Energy Forum. *Architettura & Urbanistica Solare*. Bressanone, 02-04 dicembre 2009. CD-Rom
13. Massimo D. E. (2010) Risparmio energetico e paesaggio urbano. Recenti innovazioni e sperimentazioni valutative. In: Stanghellini S. (ed) *Energia, paesaggio, valori*. Atti del Convegno della Società Italiana di Economia ed Estimo, SIEV. Venezia, 13.11.2008. In corso di stampa
14. Massimo D.E. (2010). Valuation of Urban Sustainability and Building Energy Efficiency. A Case Study. *International Journal of Sustainable Development*. ISSN: 0960-1406. In corso di stampa

FIGURE

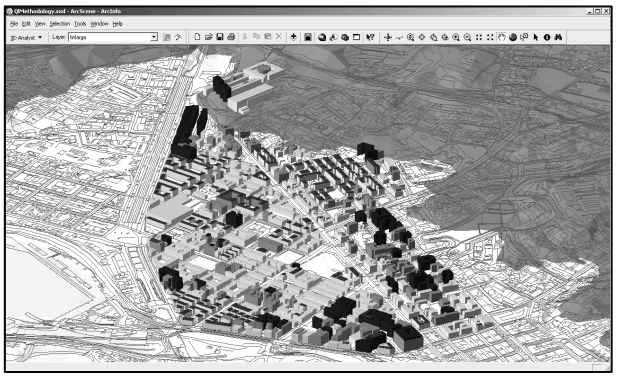


Figura 1: Reggio Calabria. Programma di <quartiere sostenibile>. Modello del terreno e rappresentazione tridimensionale degli edifici (gradazioni di ocra) e delle coperture (rosso) del Quartiere Latino in GIS. Con toni scuri sono indicate le sostituzioni dell'architettura Liberty con palazzine speculative multi-piano

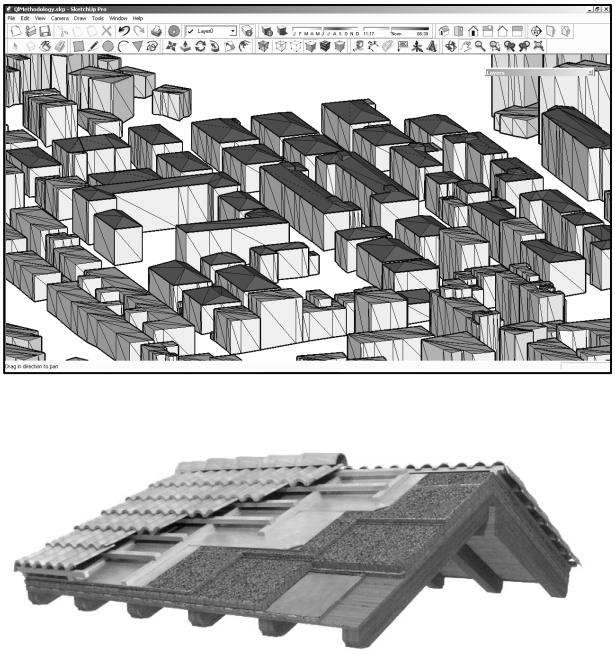
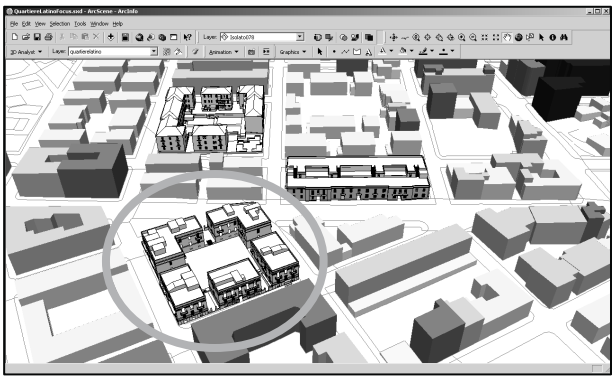


Figure 2-3: Reggio Calabria. Programma di <quartiere sostenibile>. Rappresentazione tridimensionale degli edifici. Modellazione dei tetti del Quartiere Latino in Google SketchUp, e progettazione della ventilazione e termo-coibentazione delle coperture mediante sughero naturale lis



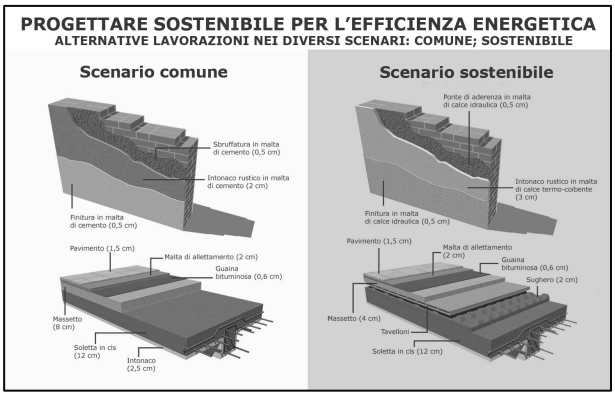


Figure 4-5: Reggio Calabria. Isolati urbani e progettazione di alternativi scenari di intervento: "comune" *versus* "sostenibile". Sostituzione di elementi costruttivi costituenti "strato di sacrificio". Differenti materiali e tecnologie che influiscono sul fabbisogno energetico degli edifici. Adozione di malte di calce idraulica naturale termo-coibente e di sughero naturale lis

PROGETTO SOSTENIBILE DI NUOVI STABILIMENTI BALNEARI

Giorgio Raffellini

Dipartimento TAeD "P.L.Spadolini" Università degli Studi di Firenze

SOMMARIO

Nel contesto europeo e nazionale dove l'attività edilizia si rivela come il settore di maggiore impatto ambientale ed energetico, si ritiene indispensabile promuovere la sostenibilità nella progettazione e nella riqualificazione degli edifici applicando principi costruttivi di sostenibilità, tesi alla limitazione dei consumi energetici ed all'utilizzazione di energie rinnovabili, nonché di materiali e tecniche mirate ad una nuova cultura ecologica del costruire.

Nella memoria viene presentato uno studio progettuale calato in quest'ottica e rivolto a stabilimenti balneari della zona Versilia , peraltro facilmente estendibile alla maggior parte delle coste italiane balneabili su concessione governativa, salvo le verifiche in loco da farsi circa i vari regolamenti regionali/provinciali/comunali , purtroppo variabili nelle diverse località. Verrà quindi presentato il confronto fra le diverse richieste per l'approvazione dei progetti dei regolamenti comunali della zona.

L' aspetto tecnico costruttivo sarà rivolto verso la sostenibilità dei vari materiali e delle tecniche da utilizzare , con riferimento all'intero ciclo della loro vita . Mentre l'impiego delle energie rinnovabili riguarderà l'uso dell'energia solare, sia termica che fotovoltaica, del minieolico, di pompa di calore , impiegata per alcuni ambienti nelle quattro stagioni.

In particolare verrà trattato il loro inserimento nelle strutture e saranno analizzati i tempi di ritorno degli investimenti.



Fig. 1 Vista aerea del litorale con gli stabilimenti balneari

1. RIFERIMENTI STORICI

Fin dal secolo diciannovesimo la zona della Versilia (dal nome del piccolo fiume che l'attraversa) era nota come luogo di villeggiatura, e sicuramente Viareggio già in epoca prenapoleonica (anno 1860), peraltro i primi due primordiali stabilimenti balneari, uno per uomini ed uno separato per donne, furono autorizzati dal Gonfaloniere nel 1827. In particolare poi la zona di Forte dei Marmi , che prese il nome proprio dal forte costruito a presidio del porto da cui si caricavano sulle navi i marmi delle Alpi Apuane, già famosi nel mondo, era la meta prediletta per la villeggiatura della nobiltà e dell'alta borghesia prevalentemente toscana, ma non sola .

Nel 1864 a Viareggio, secondo testimonianze certe , vennero costruiti i primi edifici/villini per la villeggiatura e furono realizzati gli stabilimenti destinati alle cure balneari, simili agli attuali. I primi bagni storici furono nominati Balena e Nettuno , tuttora presenti ed in gran voga.

Nel secolo successivo, già nel dopoguerra della prima mondiale (anni millenovecentoventi) ad ogni estate aumentavano sensibilmente i frequentatori della Versilia , fino a renderla poi celebre in tutto il mondo, tanto che dall' immediato dopoguerra della seconda (anni cinquanta) si è registrata una crescita esponenziale di visitatori in ogni anno. Oggi essa viene frequentata da moltissimi italiani , soprattutto lombardi e toscani, ma anche da moltissimi stranieri, specialmente inglesi, nordici e russi.

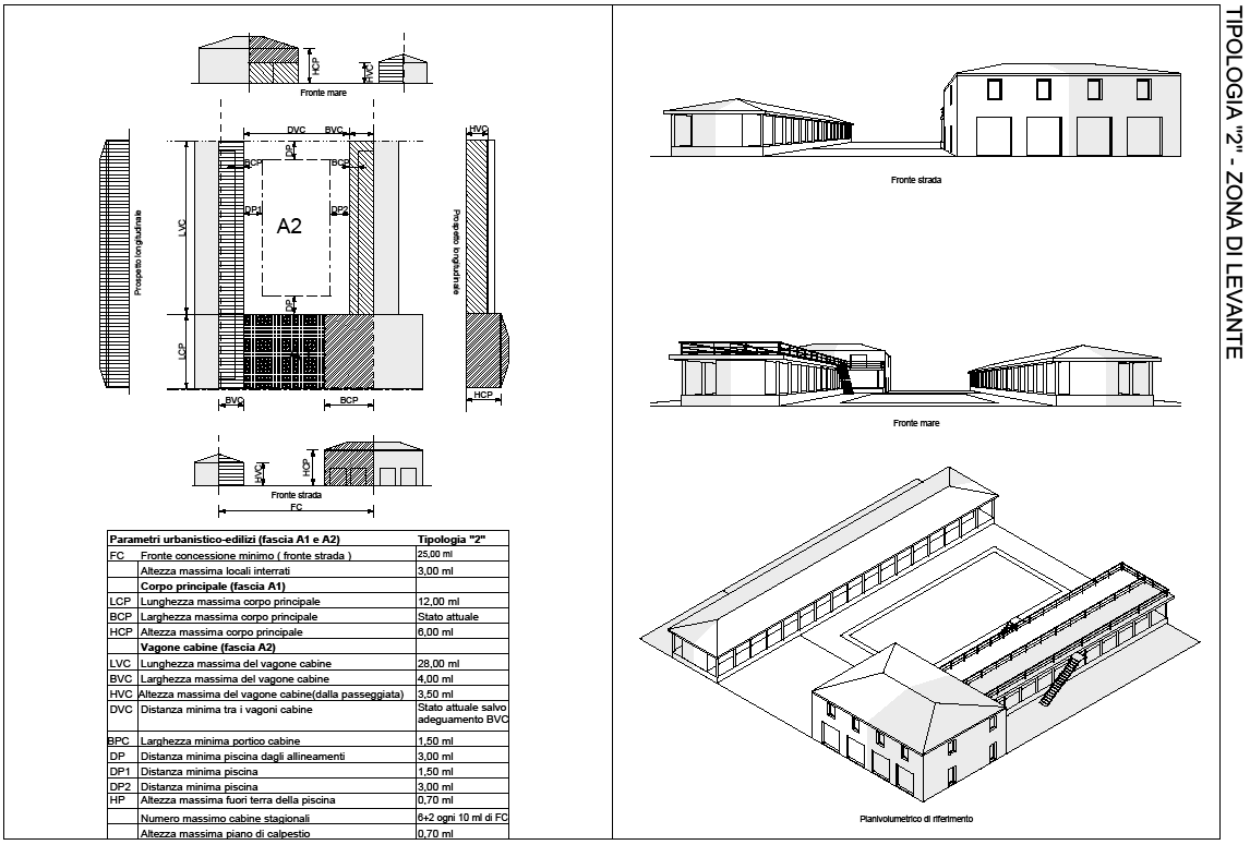
I bagni si sono sempre presi presso gli stabilimenti balneari, che via via hanno ricoperto quasi interamente tutta la costa versiliese , estesa da Marina di Pietrasanta a Nord fino a Torre del Lago a Sud, attraverso le più celebrate Viareggio (famosa anche per il Carnevale) e Forte dei Marmi, e di fatto essa comprende i seguenti comuni : Pietrasanta, Forte dei Marmi, Seravezza, Stazzema, Viareggio, Camaiore, Massarosa e Torre del Lago.

Naturalmente dalla zona e dalla gestione dei singoli stabilimenti dei circa 510 presenti lungo tale costa , dipendono molte cose : la cura, l'arredo, l'aspetto scenografico, ed infine attorno ad essi ruota buona parte dell'economia della zona . Va sottolineato che i "bagni" , pur essendo su terreno demaniale in concessione, e quindi oggetto di autorizzazioni all'uso teoricamente revocabili, hanno un rilevante valore commerciale, tanto che esso non è mai inferiore ai 500.000 € ed in taluni casi raggiunge vette di 2 e passa milioni di euro.

Rivestendo i "bagni" tanta importanza sono oggetto di regolamenti comunali, spesso diversi in molte regole .

2. SITUAZIONE ODIERNA E REGOLAMENTI COMUNALI , SCOPO

Gli stabilimenti balneari , talora sede oggigiorno sul fronte lungomare anche di attività commerciali , sono pressoché standardizzati ed in zona vengo chiamati "vagoni" (vedasi foto fig. 1 e fig.2) . Essi sono costituiti di solito da una struttura muraria disposta verticalmente al mare , con cabine, servizi vari di spiaggia, con bar-ristorante , e varie zone giochi.



Parametri urbanistico-edilizi (fascia A1 e A2)		Tipologia "2"
FC	Fronte concessione minimo (fronte strada)	25,00 ml
	Altezza massima locali interrati	3,00 ml
	Corpo principale (fascia A1)	
LCP	Lunghezza massima corpo principale	12,00 ml
BCP	Larghezza massima corpo principale	Stato attuale
HCP	Altezza massima corpo principale	6,00 ml
	Vagone cabine (fascia A2)	
LVC	Lunghezza massima del vagone cabine	28,00 ml
BVC	Larghezza massima del vagone cabine	4,00 ml
HVC	Altezza massima del vagone cabine(dalla passeggiata)	3,50 ml
DVC	Distanza minima tra i vagoni cabine	Stato attuale salvo adeguamento BVC
BPC	Larghezza minima portico cabine	1,50 ml
DP	Distanza minima piscina dagli allineamenti	3,00 ml
DP1	Distanza minima piscina	1,50 ml
DP2	Distanza minima piscina	3,00 ml
HP	Altezza massima fuori terra della piscina	0,70 ml
	Numero massimo cabine stagionali	6+2 ogni 10 ml di FC
	Altezza massima piano di calpestio	0,70 ml

Fig. 2 Tipologia tipica di stabilimenti balneari "vagoni", con negozi fronte viale.

I Comuni hanno più volte negli anni dettato regole di realizzazione e gestione , taluni in modo molto dettagliato, rivolgendo l'attenzione sia al progetto delle opere che alla conduzione delle varie attività . Succede così , come purtroppo troppo spesso capita in Italia che ogni Comune detti le sue regole , sovente senza tener conto di quello che deliberano quelli limitrofi , anzi talvolta in disaccordo .

Sotto i profili costruttivi ed energetici , che più interessano la presente ricerca , in generale essi fanno riferimento da un lato per la realizzazione/ristrutturazione di parti di edificio a criteri di rispetto ambientale, o sostenibili, e dall'altro alle Leggi ed ai Decreti sulla certificazione energetica . Vengono imposti in tutti i limiti per i valori delle trasmittanze termiche degli elementi dei contorni opachi e trasparenti, mentre grande differenza esiste oggi sull'applicazione delle energie rinnovabili, avendone proibito qualsiasi applicazione il Comune di Forte dei Marmi , mentre quello di Viareggio ha dettato regole precise e rese obbligatorie alcune di tali fonti, mentre nessuna prescrizione esiste al riguardo nel Comune del Lido di Camaiore , dove viene proposta la seguente progettazione.

Nella memoria viene presentato uno studio progettuale calato in quest'ottica e rivolto a stabilimenti balneari della zona Versilia , peraltro facilmente estendibile alla maggior parte delle coste italiane balneabili su concessione governativa, salvo le verifiche in loco da farsi circa i vari regolamenti regionali/provinciali/comunali , purtroppo variabili nelle diverse località.

3. PLANIMETRIE, DESTINAZIONI E DISTRIBUZIONE DI SPAZI

Essendo perpendicolare al mare il "vagone" si sviluppa da Est, con l'accesso dai viali del lungomare, ad Ovest , e quindi ha una vasta esposizione a Sud.

Ne esistono , tuttavia, di due tipi , principalmente in dipendenza dalla zona in cui sorgono , e cioè quelli più centrali , che restano aperti tutto l'anno ed hanno diversi negozi (da due a sei) sul fronte viale/passeggiata , appartamenti per i proprietari o per i custodi, ristorante , mentre quelli più periferici di solito limitano l'apertura alla sola stagione con villeggianti, , e quindi limitati ai servizi estivi, con cabine e bar .

Il presente studio si rivolge a quelli del primo tipo (fig. 2) , che sono di solito così costituiti:

- al piano terra ad Est vi sono un paio di negozi, ad a lato la zona prospettica del bagno, che deve risultare ben accattivante, seguono poi i negozi le varie cabine, con in testa il bar-ristorante , il tutto fiancheggiato da spazi giardino, giochi, docce , anche piscina,

al piano primo sopra i negozi vi sono di solito due piccoli appartamenti , mentre

- al piano cantina i loro depositi e laboratori, ed ancora
- sopra alle cabine il solarium, e sotto ancora cabine e magazzini. Infine gli ombrelloni o le tende verso il mare, di solito con telo quadrato/rettangolare, tipiche della zona.

4. TIPOLOGIE D'INTERVENTO E COSTRUTTIVE

Nelle ricostruzioni/ristrutturazioni , di solito con ampliamenti,

sono imposte in ogni Comune regole molto precise anche per i dettagli costruttivi. Ovunque però i Comuni, orientati a tener conto dell'ipotetica aleatorietà delle concessioni, impongono soluzioni costruttive teoricamente smontabili ed amovibili , testualmente "*Strutture portanti e pareti:* in legno o acciaio comunque con elementi puntiformi per favorire la flessibilità nell'uso e la facile removibilità;" .

Quindi vengono prevalentemente utilizzate quelle in legno , che meglio si adattano a tali prerogative e consentono architetture più consone al gradimento della clientela media.

Strutture di tale tipo , opportunamente valutate in altra sede con adeguate metodologie e programmi [1] , hanno mostrato anche migliori risultati negli esami relativi all'LCA.

Esse hanno in generale anche costi realizzativi più contenuti , mentre non è così per la manutenzione, poichè essa richiede periodici interventi di rinnovamento superficiale, essendo il legno notoriamente più sensibile agli attacchi dell'aria salmastra rispetto all'acciaio.

5. ATTIVITÀ E PERIODI DI USO, CONSUMI ENERGETICI

I negozi in molti casi restano aperti per gran parte o tutto l'anno, così come alcuni bar-ristoranti, mentre ovviamente la gestione della spiaggia va da inizio Maggio (poco) a metà Ottobre (poco), con le solite punte di frequentanti in Luglio ed Agosto.

Per il caso qui esaminato , con utilizzo annuale , sono stati desunti dalle bollette del 2009 i seguenti consumi derivanti dalle attività già descritte (Fig. 3), comprensivi delle attività dello stabilimento balneare e di due alloggi, ma con l'esclusione dei negozi , gestiti da terzi , per i quali non sono noti i consumi.

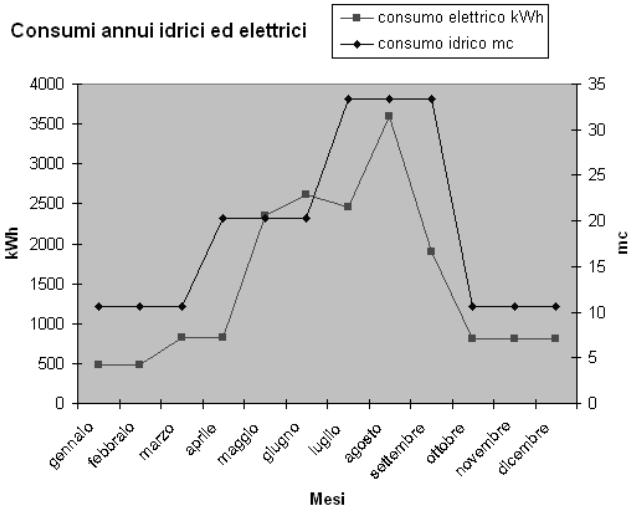


Fig. 3 Consumi registrati da bollette nell'anno 2009

Va segnalato che negli ultimi anni le attrezzature di spiaggia ed i servizi offerti sono assai cambiati, infatti i bagni più "modernizzati" offrono oggi l'uso di una piscina , talora con acqua riscaldata per le medie stagioni, e per la spiaggia moderni ombrelloni o tende ad apertura/chiusura elettrica e con attacco a rete elettrica per TV , Computers o Videogiochi.

Tutto ciò aumenterebbe pertanto ed in misura sensibile i consumi di energia sia termica che elettrica, sopra riportati.

Se si considera anche il caso in cui vengano accorpati pure i consumi dei negozi , utilizzando per la loro climatizzazione impianti a pompa di calore di tipo aria-aria, o meglio acqua-aria , i consumi elettrici allargati a gran parte dell'anno meglio si adatterebbero a produzione di energia elettrica sul posto.

6. PROPOSTE DI CONTENIMENTO DEI CONSUMI ED UTILIZZO DI ENERGIE ALTERNATIVE INTEGRATE

Qualora si proceda alla riqualificazione delle strutture edili si dovrà rispettare quanto disposto dai Decr. Leg. sulla certificazione energetica, tenendo conto di un clima mite (GG medi della zona sui 1420 e zona climatica D, prossima a C) , ed in ogni caso perseguire i possibili risparmi ovunque.

Essendo abbastanza elevati i consumi di energia elettrica per i diversi usi : attrezzature varie del bar-ristorante, eventuale gruppo frigo per il condizionamento dello stesso, fabbisogno acqua calda per la cucina e per le docce, eventuale riscaldamento dell'acqua della piscina nelle giornate meno calde , si sono ipotizzate le seguenti soluzioni rinnovabili :

collettori solari per riscaldamento ACS e piscina , integrati nel prospetto lato Sud (fig. 4) ,

pannelli fotovoltaici , pure in parte integrati come sopra ed ancora posti sul solarium, o addirittura sulle tende ,

minieolico , installati sui pennoni portabandiera .

Più in dettaglio :

- riguardo ai collettori solari , o solare termico, facendo riferimento ai seguenti dati progettuali e tenendo conto del prevalente uso estivo dell'ACS:

dati meteo di Pisa (Lat Nord di circa 44°, irradiazione solare media giornaliera 2,2 – 2,5 kWh/m_2) , falda a Sud , superficie circostante chiara, inclinazione 20° , senza ombreggiamenti, temperatura dell' acqua di rete 15°C , e di uso 39 °C , fabbisogno giornaliero, considerando 30 litri per doccia per la media di 100 docce/giorno =3000 litri /g , e di altri 500 per usi di cucina, se ne ricava un fabbisogno giornaliero nel periodo estivo attorno a 3500 litri ,

dati dell'impianto :

a circolazione forzata , su 40 collettori piani con vetro singolo chiaro di sup. 2 m2 /cad per tot di 80 m2 Solatron e 5 bollitori per accumulo da 1000 litri cad (1 X 1 m), con doppio scambiatore di calore, a due livelli di temp, con regolatore di ricarica e prelievo.

Mediante calcoli condotti con metodo f-chart ne risulta una copertura annua attorno al 58 % , e quindi a fronte di una spesa totale per l'impianto di circa 35.000 €, con costi di manutenzione pari al 3% e durata dello stesso di 20 anni , potendo godere della detrazione del 55 % , ne risultano i seguenti TR : rispetto a boiler elettrici : circa 3 anni, rispetto a caldaia a metano circa 8 anni, e con una quantità annua di CO2 non emessa in atmosfera pari ad oltre 23.000 kg/anno.

- celle fotovoltaiche :

i dati meteo di riferimento restano quelli già illustrati, e così pure per la posa come per quelli termici, mentre per l'installazione sono considerati pannelli Conergy Sun Topo , moduli Powerplus di potenza di picco nominale resa 200 Wp , in silicio policristallino ad alto rendimento (14%), con 50 moduli, per complessivi 10 kWp, con gruppi di conversione di tipo monofase, ed Inverter Conergy IPG 5000 Vision (resa media 92 %). .Per la fornitura e l'installazione di tali apparecchiature , comprensive di : sostegni, fissaggi, canalizzazioni ed allacciamenti , con protezioni da scariche atmosferiche e collegamenti di terra, si prevede una spesa di circa 20.000 € , e quindi, ipotizzando di ottenere ogni anno 1.500 Wh /kWp, quindi dall'impianto 15.000 kWh , con il rimborso previsto dal conto energia per pannelli integrati pari a 0,48 €/kWh , si ottiene un TR di circa 8-9 anni.

- microeolico (fig.5) con i possibili usi :

1. stand alone , non in rete, con batterie di accumulo
2. on grid , in rete , con scambio sul posto
3. utilizzo diretto tramite resistenze elettriche od in varie trasformazioni , non adatto.

La seconda soluzione è parsa nel caso in esame la più interessante , e , mancando dati locali specifici di ventosità, ma affidandosi a quelli reperiti della stazione più prossima (aeroporto di Pisa) , e quindi ipotizzando 2200 ore utili/ anno, cioè con velocità > 2,5 m/s, se ne desume , secondo i dati di energia resa dati dal costruttore italiano , per ogni aerogeneratore tripala da 1 kW (diametro circa 3m) , una disponibilità presumibile di almeno 2250 kWh el/ anno.

Gli aerogeneratori, previsti in numero di 3 , con pala "ecologica" in policarbonato con motore integrato, dotati di controlli elettronici ed inverter, sono da porre sui pennoni metallici per le bandiere , tipici della zona , disponibili eventualmente anche per fari dell'illuminazione esterna.

Quindi con una stima orientativa si prevede di raccogliere complessivamente attorno ai 7.000 kWh / anno, a fronte di una spesa complessiva di installazione per i tre aerogeneratori e le apparecchiature complementari di circa 10.000 € .

Si potrebbe quindi avere, avvalendosi del conto energia eolico (circa 30 centesimi di euro) , tenuto conto di una vita media di 20 anni , delle manutenzioni e degli abituali tassi , di un TR di circa 6-7 anni .



Fig. 4 integrazione di collettori solari e pannelli fotovoltaici

Va evidenziato che per il regolamento comunale di Lido di Camaiore per le installazioni qui descritte è sufficiente una denuncia di inizio attività (DIA) , mentre attualmente sembra di non semplice e conveniente attuazione l'assicurazione contro i furti e gli atti vandalici.



Fig. 5: Esempio di inserimento di pala minieolica in stabilimento balneare

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. P. Neri ed altri: Verso la valutazione ambientale degli edifici (L.C.A.) a supporto della progettazione ecosostenibile , Ed. Alinea , Firenze 2007

CERTIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI BASATA SUL METODO ASSET RATING: PRINCIPALI ERRORI NELLE PROCEDURE DI CALCOLO

Daniele Milone [1], Salvatore Pitruzzella [2]

[1] Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali. Università di Palermo. daniele.milone@dream.unipa.it
[2] Dipartimento di Ingegneria Civile. Università di Messina. pitruzzella@architettura.unipa.it

SOMMARIO

Le metodologie per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici residenziali esistenti differiscono sostanzialmente da quelle impiegate per gli omologhi edifici di progetto. Anche se le analogie fisiche sono molte e le grandezze utilizzate sono identiche, il contesto ed il campo di applicazione differiscono in maniera notevole.

Fondamento di qualsiasi procedura di stima dovrebbe essere la replicabilità e l'univocità dei risultati ottenuti, fattori spesso disattesi.

In questo articolo vengono individuate le cause e le probabilità di errore nell'applicazione delle metodologie di calcolo, e viene valutata l'imprecisione attesa sul risultato finale.

INTRODUZIONE

La direttiva europea sul rendimento energetico degli edifici (*EPBD*) [1], prevede che tutti gli edifici residenziali dispongano di un attestato di certificazione energetica.

Tale direttiva prescrive i requisiti in merito a:

- Struttura generale del metodo di calcolo delle prestazioni energetiche complessive degli edifici;
- Requisiti minimi delle prestazioni;
- Metodologia generale di certificazione;
- Ispezioni.

I requisiti sopra elencati dovevano essere adottati dai 25 paesi membri dell'UE entro il 4 gennaio 2006. Nella coerenza con questi principi generali è responsabilità specifica di ogni stato membro scegliere poi le misure che meglio corrispondono alle particolari situazioni nazionali.

Il certificato, basato su una oggettiva valutazione delle prestazioni, deve esprimerne il rendimento energetico come un indicatore numerico che consente l'attribuzione di una classe di consumo specifico all'edificio.

La prestazione energetica riferita al consumo di energia primaria necessario per riscaldare, raffrescare, produrre acqua calda sanitaria e per illuminare l'edificio, è espressa in kWh di energia primaria.

L'indice di prestazione energetica EP (energia primaria), a sua volta, esprime l'energia primaria in funzione della superficie utile netta dell'edificio in kWh/m^2 anno. In questo modo è possibile confrontare la prestazione energetica riferita al singolo metro quadro di più edifici.

La classe di prestazione energetica viene definita rispetto ad un intervallo convenzionale di valori dell'indice di prestazione energetica espresso in valore numerico e parametrizzata rispetto ad una scala di prestazione energetica comunemente dalla Classe A (bassi consumi) alla Classe G (alti consumi).

La metodologia per la valutazione del rendimento energetico su cui basare la certificazione energetica per gli edifici esistenti è continuamente al centro di un dibattito da parte della comunità scientifica internazionale.

Tra le questioni chiave per lo sviluppo di tale metodologia abbiamo la valutazione dell'accuratezza del processo di stima nel suo complesso e la riproducibilità dei risultati, fattori questi di fondamentale importanza per la credibilità di un sistema di certificazione. Obiettivo principale della direttiva è quello di migliorare il rendimento energetico degli edifici, inteso come la quantità di energia effettivamente consumata che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dello stesso, compresi il riscaldamento invernale ed il raffreddamento, la produzione d'acqua sanitaria, la ventilazione e l'illuminazione.

Secondo le Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici [2], i metodi di calcolo vengono divisi in "metodo di calcolo di progetto" il quale prevede la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso del progetto energetico dell'edificio come costruito e dei sistemi impiantistici a servizio dello stesso, e "Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio o standard", il quale prevede la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso ricavati da indagini svolte direttamente sull'edificio esistente. In questo secondo caso, le modalità di approccio possono essere:

- Mediante procedure di rilievo, anche strumentali, sull'edificio e/o sui dispositivi impiantistici effettuate secondo le normative tecniche di riferimento, previste dagli organismi normativi nazionali, europei e internazionali, o, in mancanza di tali norme dalla letteratura tecnico-scientifica;

- Per analogia costruttiva con altri edifici e sistemi impiantistici coevi, integrata da banche dati o abachi nazionali, regionali o locali;
- Sulla base dei principali dati climatici, tipologici, geometrici ed impiantistici.

Il rilascio dei certificati per il parco edilizio esistente rappresenta uno sforzo molto importante. Determinare la qualità energetica di un edificio esistente, appare una operazione molto più difficile rispetto ad un edificio di progetto per una serie di difficoltà oggettive nel reperimento sia dei dati geometrici che termofisici delle strutture che lo compongono.

L'accuratezza e la riproducibilità del processo di valutazione delle prestazioni energetiche rappresenta un obiettivo di principale importanza per la standardizzazione delle procedure [3].

QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

Le Direttive Europee 2002/91/CE e 2006/32/CE [4] sono le direttive di riferimento in Europa per la certificazione energetica e sono state emanate dall'Unione Europea con le seguenti finalità:

- Diminuire di circa il 22% i consumi energetici comunitari entro il 2010;
- Ottenere un risparmio di energia primaria pari a 55 milioni di tep;
- Ridurre le emissioni di CO_2 di un valore pari a 100 milioni di tonnellate;
- Introdurre nuovi standard progettuali Per quanto riguarda la 2006/32/CE (recepita a livello nazionale dalla 115/2006 che introduce le UNI TS 11300 [5]) l'obiettivo è migliorare l'efficienza degli usi finali di energia sotto il profilo costi/benefici negli stati membri (ridurre i consumi del 9%).

Tali direttive richiedono agli stati membri europei di provvedere affinché gli edifici di nuova costruzione e gli edifici esistenti che subiscono ristrutturazioni importanti, soddisfino requisiti minimi di rendimento energetico, cioè se "la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio, compresi, fra gli altri, il riscaldamento e il raffreddamento".

L'Attestato di Certificazione Energetica (ACE) deve essere messo a disposizione in fase di costruzione, compravendita o locazione di un edificio e in esso devono essere riportati "dati di riferimento che consentano ai consumatori di valutare e raffrontare il rendimento energetico dell'edificio" e "raccomandazioni per il miglioramento del rendimento energetico in termini di costi-benefici".

A livello nazionale le normative di riferimento sono:

- D.lgs. 192/05 in vigore dal 8/10/2005: "attuazione della Direttiva 2002/91/CE"
- D.lgs. 311/06 in vigore dal 2/2/2007: "disposizioni correttive al D.lgs.192/05"
- DPR 59/09 in vigore dal 25/06/09;
- DPR 158/09 (linee guida nazionali).

METODI DI CALCOLO DELLA PRESTAZIONE ENERGETICA - UNI/TS 11300

La certificazione energetica si basa sul calcolo della prestazione energetica del singolo edificio. Le norme UNI/TS 11300, definiscono la procedura di calcolo della prestazione energetica che prevede:

- Parte 1: Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;
- Parte 2.1: Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la preparazione acqua calda sanitaria;
- Parte 2.2: Prestazioni energetiche degli edifici – Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria;
- Parte 3: Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva.

La suddivisione in 4 norme consente di calcolare per step successivi:

1) Il fabbisogno di energia necessario per riscaldare e raffrescare l'edificio in relazione alle sue caratteristiche geometriche e termofisiche;
2) Il fabbisogno di energia eroga dagli impianti in relazione alle caratteristiche ed hai rendimenti dei diversi sottosistemi impiantistici necessari per riscaldare o raffrescare l'edificio in base al fabbisogno di energia di cui al punto precedente, incluso il calcolo dell'energia necessaria per riscaldare l'acqua calda sanitaria ed incluso i consumi di energia elettrica ausiliaria utilizzata per il funzionamento dei sottosistemi impiantistici (fan coil, pompe di circolazione, ventilatori, ecc...);
3) Il calcolo dell'energia primaria in relazione al fabbisogno di energia erogata dagli impianti e dal tipo di combustibile.

In questo modo è possibile, non solo calcolare la prestazione energetica, ma anche calcolare i miglioramenti dell'efficienza energetica conseguibili intervenendo separatamente su edificio e/o impianti e/o singoli sottosistemi impiantistici.

La prestazione energetica può essere calcolata secondo le metodologie:

- *"Valutazione energetica di calcolo" (design rating o asset rating) o metodo calcolato* secondo le UNI/TS 11300, sulla base di dati di ingresso di progetto, reali o adattati in base all'utenza, che, a seconda del tipo di valutazione, valuta secondo un algoritmo di calcolo la prestazione energetica a partire da dati di ingresso relativi all'edificio e a condizioni d'uso standard (temperatura interna, aerazione, funzionamento impianti etc…). Il margine di incertezza è dato dal livello di dettaglio dei dati di ingresso;
- "*Valutazione energetica di esercizio",* o "*metodo a consuntivo" (operational rating),* o "*dai consumi energetici reali o presunti*", solo per edifici esistenti che valuta la prestazione energetica a partire dai consumi energetici reali ricavabili dalle bollette. Il margine di incertezza è dato dal metodo di raccolta dei dati di ingresso relativi ai consumi e dalla difficoltà di normalizzare le caratteristiche dell'utenza e delle condizioni d'uso. L'intervallo di incertezza è maggiore rispetto ai valori calcolati con il metodo precedente.

Tale specifica tecnica definisce le modalità per l'applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008 [6] con riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento. La specifica tecnica è rivolta a tutte le possibili applicazioni previste dalla UNI EN ISO 13790:2008: calcolo di progetto (*design rating*), valutazione energetica di edifici attraverso il

calcolo in condizioni standard (*asset rating*) o in particolari condizioni climatiche e d'esercizio (*tailored rating*) [7].

La norma UNI EN ISO 13790:2008 presenta una serie di metodi di calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento ambiente di un edificio e dell'influenza delle perdite degli impianti di riscaldamento e raffrescamento, del recupero termico e dell'utilizzo delle fonti di energia rinnovabile. Tale norma può essere utilizzata per le seguenti applicazioni:

- Valutare il rispetto di regolamenti espressi in termini di obiettivi energetici;
- Confrontare le prestazioni energetiche di varie alternative progettuali per un edificio in progetto;
- Indicare un livello convenzionale di prestazione energetica degli edifici esistenti;
- Stimare l'effetto di possibili misure di risparmio energetico su un edificio esistente, calcolando il fabbisogno di energia con e senza ciascuna misura;
- Prevedere le esigenze future di risorse energetiche su scala nazionale o internazionale, calcolando i fabbisogni di energia di tipici edifici rappresentativi del parco edilizio.

I metodi forniti dalla EN ISO 13790:2008 comprendono il calcolo dei seguenti termini:

- Lo scambio termico per trasmissione e ventilazione dell'edificio quando esso è riscaldato o raffrescato ad una temperatura interna costante;
- Il contributo degli apporti termici interni e solari al bilancio termico dell'edificio;
- I fabbisogni annuali di energia termica per riscaldamento e raffrescamento, al fine di mantenere le temperature prefissate di regolazione all'interno dell'edificio.

Per i dati di ingresso e per particolari procedimenti di calcolo non forniti dalla UNI EN ISO 13790:2008, l'utente può fare riferimento ad altre norme internazionali o nazionali.

In particolare questo vale sia per il calcolo dell'efficienza che per le perdite di calore degli impianti di riscaldamento.

Tutte le suddette applicazioni trovano riscontro in diversi tipi di valutazione energetica di calcolo, come riportato nella tabella 1 che segue.

Tabella 1. Classificazione dei diversi tipi di calcolo.

Tipo di valutazione	Dati in ingresso			Scopo
	Uso	Clima	Edificio	
Design rating	Standard	Standard	Progetto	Permesso di costruire, Certificazione o Qualificazione energetica del progetto
Asset rating	Standard	Standard	Reale	Certificazione o Qualificazione energetica
Tailored rating	In funzione dello scopo		Reale	Ottimizzazione, Validazione, Diagnosi e programmazione di interventi di riqualificazione

IL CALCOLO IN ASSET RATING

La procedura di calcolo per arrivare al bilancio energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento è la seguente:

1) Definizione dei confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e non climatizzati dell'edificio;
2) Definizione dei confini delle diverse zone di calcolo, se richiesta;
3) Definizione delle condizioni interne di calcolo e dei dati di ingresso relativi al clima esterno;
4) Calcolo, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni di energia termica per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e il raffrescamento ($Q_{C,nd}$);
5) Aggregazione dei risultati relativi ai diversi mesi ed alle diverse zone servite dagli stessi impianti.

Per quanto riguarda la procedura di calcolo finalizzata al fabbisogno in regime invernale, è desumibile dalla (1) che segue:

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr}+Q_{H,ve})-\eta_{H,gn}\cdot(Q_{int}+ Q_{sol}) \quad (1)$$

dove:

$Q_{H,nd}$ = fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per il riscaldamento;
$Q_{H,tr}$ = scambio termico per trasmissione;
$Q_{H,ve}$ = scambio termico per ventilazione;
$\eta_{H,gn}$ = fattore di utilizzazione degli apporti termici;
Q_{int} = apporti termici interni;
Q_{sol} = apporti termici solari.

Per quanto riguarda la procedura di calcolo finalizzata al fabbisogno in regime estivo, è desumibile dalla (2) che segue:

$$Q_{C,nd} = (Q_{int}+ Q_{sol}) - \eta_{C,ls}\cdot(Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (2)$$

dove:

$Q_{C,nd}$ = fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per il raffrescamento;
Q_{int} = apporti termici interni;
Q_{sol} = apporti termici solari;
$\eta_{C,ls}$ = fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche;
$Q_{C,tr}$ = scambio termico per trasmissione;
$Q_{C,ve}$ = scambio termico per ventilazione.

LA VALUTAZIONE DEGLI ERRORI

La valutazione del rendimento energetico di un edificio in base alla procedura di *asset rating* consta di diverse fasi [8].

In ognuna di queste può essere contenuta una certa aliquota di errori, che sommati e combinati durante la procedura di calcolo, o nella prodromica fase di acquisizione dei dati, daranno origine allo scostamento complessivo dal valore reale.

L'acquisizione dei dati per la certificazione di un edificio esistente o per la verifica di uno di nuova costruzione comporta difficoltà quali la non reperibilità del progetto cartaceo e la non corrispondenza dello stesso con il costruito [9].

Spesso non conoscendo la stratigrafia delle strutture opache è necessario avere strumenti di misura in opera quali il termo flussimetro.

In mancanza, spesso ci si affida all'esperienza del tecnico.

METODOLOGIA

Per determinare l'errore finale nella valutazione o diagnosi energetica di un involucro edilizio, è stato simulato, attraverso l'impiego dell'algoritmo semplificato per la determinazione del fabbisogno energetico, il comportamento di una semplice abitazione unifamiliare su due livelli con i dati climatici della città di Palermo [10]. Le caratteristiche geometriche dell'edificio, nonché termofisiche delle principali componenti sono riportate nelle tabelle 2 e 3 che seguono.

Tabella 2. Dati dimensionali dell'edificio.

Caratteristiche geometriche dell'involucro edilizio	
Altezza esterna complessiva	6.8 m
Altezza interna	2.8 m
Dimensioni base in pianta intero edificio	27*13 m
Dimensioni base in pianta singola unità	15*13 m
Superficie laterale totale	591 m^2
Superficie disperdente totale	1 100 m^2
Volume lordo intero edificio	2 472 m^3
Rapporto S/V	0.480 m^{-1}

Tabella 3. Caratteristiche degli elementi costruttivi.

Caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio		
Elemento	**Tipologia**	**Transmittanza (U) W/m^2K**
Pareti perimetrali	Struttura pesante con isolamento ed intercapedine	0.25
Solaio controterra	Areato	0.33
Solaio copertura	Laterocemento con isolamento sull'estradosso	0.20
Vetro	Vetro camera basso emissivo con argon 4-16-4	1.40
Telaio infissi	PVC con taglio termico e tenuta al vento	2.00
	Altri fattori	**Valori**
Fattore solare ortogonale delle superfici vetrate (g_{ort})		0.60
Rapporto tra superficie del telaio e la superficie del vetro (S_{tel}/S_{tot})		0.30

Di volta in volta sono stati sostituiti alcuni dei valori di cui sopra, inducendo volutamente gli errori più comuni, quando si opera su edifici esistenti e di cui non si dispone di sufficiente documentazione.

Tra questi, la valutazione della trasmittanza delle componenti opache e delle componenti trasparenti, nonché delle caratteristiche di ventilazione e di tenuta degli infissi.

Il calcolo dell'edificio in condizioni standard e di riferimento (*baseline)* è stato ripetuto attraverso l'impiego del software ENERGY PLUS versione 4.0, al fine di indagarne meglio il comportamento termofisico [11].

Nelle figure 1 - 9 che seguono, sono riportate alcune schermate dell'output relativamente alle perdite di calore, le temperature, l'umidità e gli apporti di calore ed consumi su base giornaliera.

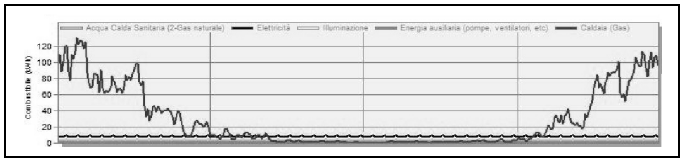


Figura 1. Consumo di energia primaria per i vari usi.

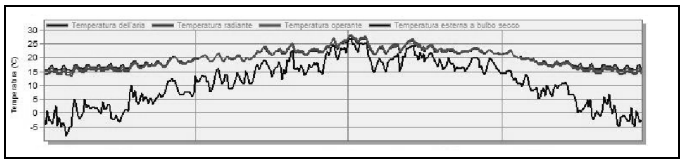


Figura 2. Temperature.

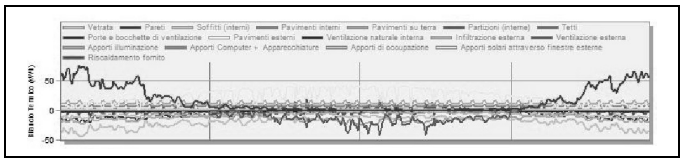


Figura 3. Carico termico dei vari componenti.

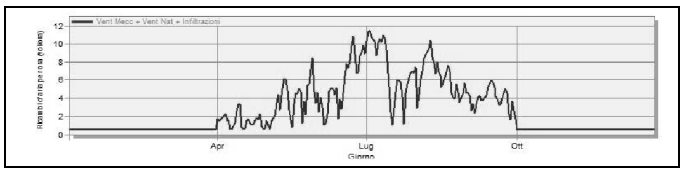


Figura 4. Ricambi d'aria.

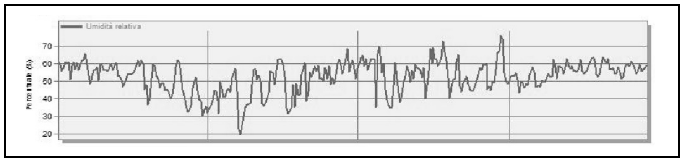


Figura 5. Umidità relativa.

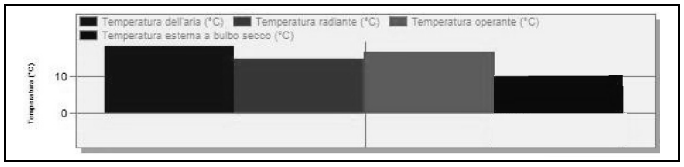


Figura 6. Temperature

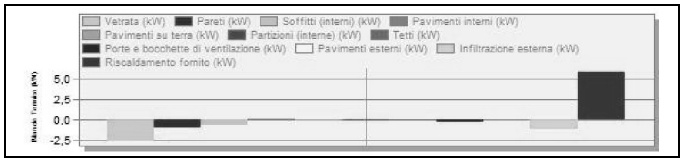


Figura 7. Potenza termica.

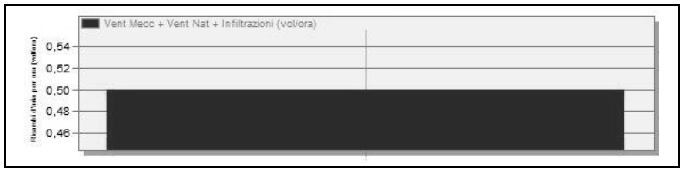


Figura 8. Ventilazione + infiltrazioni d'aria.

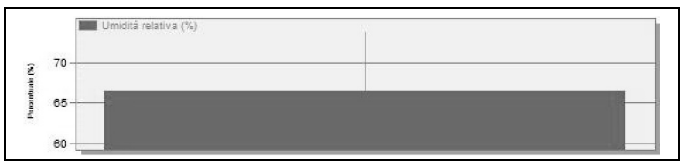


Figura 9. Umidità relativa.

RISULTATI

Sulla base delle simulazioni effettuate sono riportati alcuni dei risultati ottenuti introducendo l'errore ottenuto nella valutazione delle componenti.

Gli errori indotti, sono sintetizzati ed identificati nella tabella 4, mentre nella figura 10 sono riportati i risultati ottenuti introducendo il singolo errore in ognuna delle procedure di valutazione energetica.

La linea continua, rappresenta il valore di riferimento dell'edificio in condizioni *baseline* che risulta essere di 64.7 kwh/m^2 anno.

Tabella 4. Errori indotti nella stima delle componenti.

id	Fattore	Errore
A	Trasmittanza pareti perimetrali	+ 5 %
B		+ 15 %
C		– 10 %
D	Trasmittanza vetro	+ 10 %
E		+ 20 %
F		- 15 %
G	Trasmittanza telaio infisso	+ 10 %
H		- 5 %
I	Trasmittanza solaio copertura	+ 20 %
J		- 20 %
K	Trasmittanza solaio controterra	+ 20 %

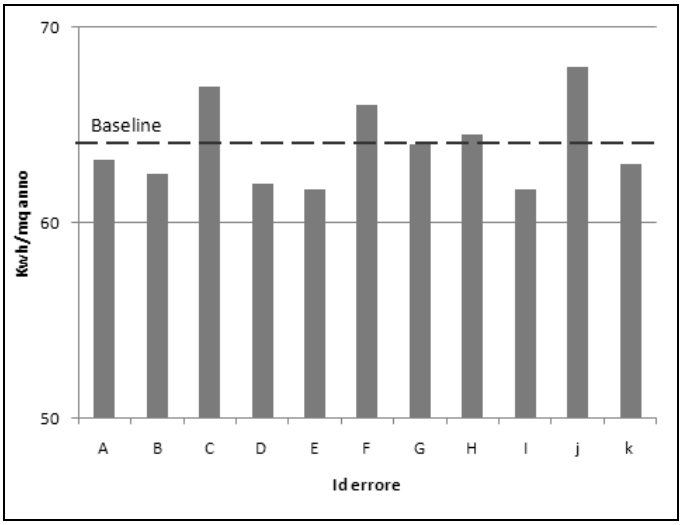


Figura 10. Differenza nelle prestazioni energetiche in funzione dell'errore sulle singole componenti.

La cumulazione degli errori

A titolo di esempio, combinando tra di loro due o più possibili errori nella fase di acquisizione dei dati, caso molto frequente nelle normali condizioni operative, si ottengono risultati ancora più falsati rispetto alla condizione *baseline*.

Nella figura tabella 5 che segue, sono identificate alcune possibili combinazioni, mentre nella figura 4 sono riportati i grafici per ognuna di esse.

Tabella 5. Combinazione degli errori indotti

id	Combinazione errori
1	A, F, H
2	B, F
3	A, E, I, K
4	B, D, K
5	C, H, J

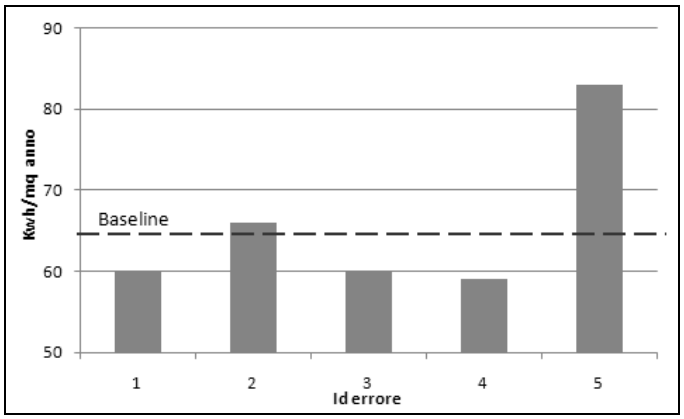


Figura 11. Differenza nelle prestazioni energetiche in funzione di combinazione di errori.

Gli errori nella fase di acquisizione dati, influiscono fino al 30% sul risultato finale del calcolo delle prestazioni energetiche in *asset rating*.

Se a questa aliquota aggiungiamo i possibili errori derivanti dalla discordanza dei risultati ottenibili con l'impiego di software diversi [12] che possono arrivare anche al 10% ed un ulteriore 5% intrinseco quale aliquota di errore del calcolo stesso, rispetto alle prestazioni reali misurate dell'involucro [13] otteniamo il cumulo massimo degli errori [14].

Tale sequenza cumulativa è riportata nel grafico di figura 5 che segue.

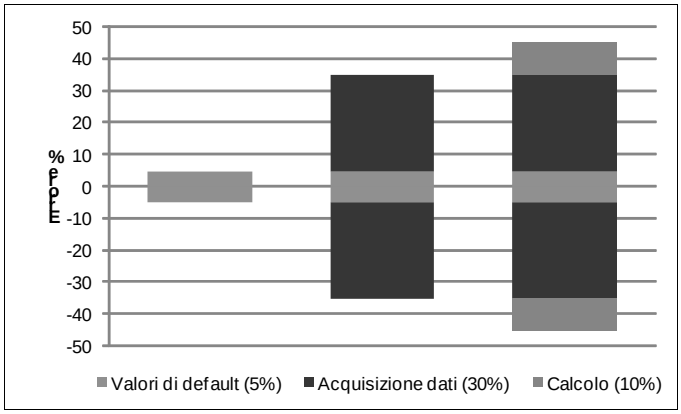


Figura 12. Cumulativo degli errori nelle singole fasi della diagnosi energetica.

CONCLUSIONI

In questo articolo vengono evidenziati i limiti della procedura in *asset rating* della certificazione energetica degli

edifici.

Poiché la certificazione è un indice di valutazione della prestazione energetica dell'edificio, e poiché nell'edilizia residenziale le parti opache influenzano largamente i flussi energetici tra interno ed esterno, è auspicabile dotare i certificatori di un metodo acquisizione dati standard che riduca il più possibile le prevedibili imprecisioni derivanti da metodi non professionali.

Il problema dato dalla disponibilità di dati attendibili riguardo alla stratigrafia delle componenti opache, nonché dei serramenti, riveste una questione particolarmente importante, dato che il risultato del calcolo non viene impiegato esclusivamente per valutare il soddisfacimento dei requisiti prestazionali minimi, ma serve anche per consentire un confronto diretto delle prestazioni di edifici diversi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. European Building Energy Performance. Direttiva 2002/91/CE. - EPBD. EU Directives. 2002.
2. Linee guida per la certificazione energetica degli edifici. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. Serie generale n. 158. 10/07/2009.
3. S. Pitruzzella, D. Milone, La certificazione energetica degli edifici. In Ambiente Risorse Salute – Scienza, tecnica e cultura per lo sviluppo sostenibile" Numero 103, ed. Centro Studi l'uomo e l'ambiente – Padova 2005.
4. Direttiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 5 aprile 2006 concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea del 27.4.2006.
5. Prestazioni energetiche degli edifici - "Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale" Modalità di applicazione della UNI EN ISO 13790:2008 Ente Nazionale Italiano di Unificazione - Comitato Termotecnico Italiano.
6. Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling. UNI EN ISO 13790:2008. Ente Nazionale Italiano di Unificazione. 2008.
7. L. P. Lombard, J.Ortiz, R. Gonzalez, I-R. Maestre. A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes. In Energy and Buildings 41 (2009). Elsevier Science.
8. A. Milone, D. Milone, S. Pitruzzella. The energy certification of buildings through the dynamic simulation of variable consumption. In Proceedings of renewable energy congress X, Glasgow, Scotland, 19-25 july 2008.
9. A. Panzeri, Acquisizione dati involucro. Metodi impiegabili ai fini della certificazione energetica degli edifici. In neo-EÚ' BIOS n. 14. Ed. Anit.
10. UNI 10349. Heating and cooling of buildings. Climatic data. Ente Nazionale Italiano di Unificazione - Comitato Termotecnico Italiano. 1999.
11. Avaible on: http://apps1.eere.energy.gov/
12. A. Milone, D. Milone, S. Pitruzzella. Asset rating: disagreement between the results obtained from software for energy certification. In Proceedings of 11th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition Building Simulation 2009. University of Strathclyde (GBR). Glasgow.
13. Ir. Bart Poel. Energy performance certification of existing buildings based on asset rating (epa-ed; epa-nr).
14. C. Boonstra, R. Cohen, J. Field, and B. Bordass. Field test of methodology to Produce building energy certificates based on operational Ratings

ANALISI DEL CICLO DI VITA: APPLICAZIONE AD UN EDIFICIO RESIDENZIALE AD ELEVATE PRESTAZIONI DI RISPARMIO ENERGETICO

Cinzia Buratti[1], Michele Goretti[1], Maria Cleofe Merico[1]

[1]CRB, Centro di Ricerca sulle Biomasse, Str. S. Lucia Canetola, 06125 Perugia

SOMMARIO

Nel bilancio di materie prime e risorse del "prodotto edificio" gli strumenti dell'analisi del ciclo di vita (LCA) e della dichiarazione ambientale di prodotto (DAP) possono orientare le scelte dei progettisti in relazione al conseguimento degli obiettivi di sviluppo eco-sostenibile ed efficienza energetica.

Nel presente studio, individuati i metodi di valutazione applicabili per le finalità prefissate, l'analisi si è concentrata sui materiali usati nel campo delle costruzioni, ed in particolare sulle proprietà di isolamento termoacustico degli stessi, fondamentali ai fini della loro classificazione e selezione.

L'analisi del ciclo di vita è stata applicata ad una unità immobiliare di un edificio plurifamiliare costruito per offrire elevati standard di risparmio energetico e comfort abitativo. Il metodo LCA ha consentito di valutare le fasi di vita dell'immobile sotto l'aspetto del consumo energetico e delle risorse. Si è effettuato un confronto tra un'unità abitativa assunta come caso studio e un'altra virtualmente identica (stesse dimensioni, sito ed orientamento) ma differente per stratigrafia delle partizioni (simulazione di edificio esistente, realizzato secondo tecniche di costruzione e materiali tradizionali, nel rispetto dei limiti di trasmittanza imposti per il 2006 dal D.Lgs. 311/06). L'analisi ed il confronto hanno consentito di stimare le possibilità di risparmio energetico e di riduzione degli impatti ambientali, individuando in quali fasi del ciclo di vita esse possono essere localizzate.

1. INTRODUZIONE

I consumi di energia in edilizia sono aumentati sia in valore assoluto sia in percentuale e rappresentano, oggi, circa il 40% della domanda di energia. In parallelo crescono anche le emissioni di anidride carbonica: al fine di rispettare gli impegni assunti con la firma del Protocollo di Kyoto, il settore edilizio appare pertanto uno fra quelli prioritari su cui intervenire.

La Direttiva Energy Performance of Building (EPBD) 2002/91/CE del 16/12/2002 rappresenta il più importante documento comunitario sull'*efficienza energetica* degli edifici. Essa fissa una serie di linee-guida cui i diversi Paesi membri avrebbero dovuto adeguarsi entro il 2006, promulgando un'apposita legislazione o adeguando quella esistente, dovendo obbligatoriamente procedere alla certificazione energetica degli edifici. L'obiettivo della direttiva è promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, delle prescrizioni per il microclima degli ambienti interni e dell'efficacia sotto il profilo dei costi. Viene introdotto, inoltre, il concetto di *attestato di certificazione energetica,* che ha l'obiettivo di dare informazioni sulle prestazioni dell'edificio, comprendenti i valori vigenti a norma di legge e i valori di riferimento.

L'Italia ha provveduto ad armonizzare il proprio quadro normativo con quello europeo in materia di rendimento energetico in edilizia. Con il D.Lgs. 192/05, *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*, sono stabiliti i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili; inoltre sono chiariti caratteristiche, regole guida e obiettivi riguardo alla certificazione energetica degli edifici. Il D.Lgs. 311/06 reca *Disposizioni correttive ed integrative* al D.Lgs. 192/05 ed impone scadenze specifiche. Il DPR 59/09 di attuazione del D.Lgs. 192/05 introduce il nuovo quadro di disposizioni obbligatorie in sostituzione di quelle transitorie di cui al D.Lgs. 311/06. Infine il DM del 26/06/2009 contiene le *Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*.

2. ANALISI DEL CICLO DI VITA (LCA)

Il consumo di energia nel settore industriale dei materiali da costruzione è circa il 10% di quello complessivo del settore civile: questo spiega il crescente interesse verso la bioedilizia.

La politica integrata di prodotto (*Integrated Product Policy IPP*) prevede una maggiore attenzione alle varie fasi del ciclo di vita, in quanto gli impatti ambientali derivanti dalle filiere produttive sono diversificati a più livelli: l'idea di fondo è ottenere il controllo dell'intero ciclo di vita di un prodotto attraverso l'individuazione degli impatti che i processi produttivi generano in ogni fase.

La strategia denominata *Life Cycle Thinking* (*LCT*) ha il suo sviluppo applicativo nella metodologia dell'analisi del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment, LCA*). Nella visione LCT rientrano le *etichette ecologiche*, che hanno il compito specifico di veicolare ai consumatori l'informazione sull'entità del carico ambientale del ciclo di vita di un prodotto. Tra queste si segnalano le etichette ambientali di *tipo III* (UNI ISO 14025:2006), basate sulle procedure di LCA codificate dalle norme ISO 14040, che richiedono la verifica di un organismo indipendente: appartengono a questa categoria le *Dichiarazioni Ambientali di Prodotto* (*DAP o EPD*) [1].

L'applicazione della metodologia LCA permette di prevedere ogni conseguenza che il processo di trasformazione avrà sull'ambiente. La norma UNI EN ISO 14040:2006 descrive i principi ed il quadro di riferimento per la valutazione del ciclo di vita (LCA), comprendendo:

a) la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'LCA;
b) la fase di inventario del ciclo di vita (LCI Life Cycle Inventory): si compila un inventario di ingressi (materiali, energia, risorse naturali) ed uscite del sistema (emissioni in aria, acqua, suolo, emissioni non materiali);
c) la fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA): lo scopo è di fornire informazioni aggiuntive per contribuire a valutare i risultati dell'LCI;
d) la fase di interpretazione del ciclo di vita: i risultati di LCI e/o di LCIA vengono riepilogati e discussi;
e) la rendicontazione e la revisione critica dell'LCA;
f) le limitazioni dell'LCA;
g) le correlazioni tra le fasi dell'LCA;
h) le condizioni per l'uso dei valori e di elementi facoltativi.

2.1 LCA di un Prodotto/Edificio

L'LCA applicata al settore edilizio può essere uno strumento in grado di offrire, fin dalla fase di progettazione, la possibilità di monitorare le scelte effettuate, proiettandole nell'intero ciclo di vita dell'edificio, in termini di impatto ambientale, energetico ed economico.

Il metodo LCA valuta l'effetto prodotto dai consumi energetici durante la vita dell'edificio, di solito considerata di almeno 50 anni, e permette di confrontare soluzioni tecnologiche atte ad una progettazione a basso consumo energetico. Gli impatti indotti dai cicli produttivi sono strettamente legati alle scelte effettuate durante la progettazione: l'obiettivo da perseguire è quello di generare il minore impatto possibile.

Un edificio riassume in sé tante forme di energia [2]: energia incorporata (processi connessi con la *produzione* di un edificio), energia grigia (trasporto dei materiali), energia indotta (edificazione), energia operativa (esercizio) ed energia di demolizione e riciclo (processi a fine vita).

L'applicazione dell'LCA ad un prodotto/edificio, dando la dovuta importanza all'aspetto inquinante associato alla produzione dei materiali (consumo di energia e produzione di CO_2 e rifiuti), consente di comprendere quanto possa risultare strategica dal punto di vista ambientale la scelta di componenti e prodotti.

3. METODOLOGIA DI VALUTAZIONE DELL'LCA

Nella fase di analisi e valutazione dell'impatto ambientale di un processo, una volta creato l'inventario di tutti i flussi di materiali in ingresso e in uscita, è necessario dare ad ognuno un peso in base ai possibili danni che essi producono sull'ambiente, sulla salute umana e rispetto al consumo di risorse. Tutti i metodi di calcolo utilizzabili per la valutazione di questi parametri hanno una struttura di base comune, che consiste nella valutazione di quattro indici:

1) *caratterizzazione*: l'obiettivo è uniformare i parametri relativi ai bilanci di materiali ed energia, precedentemente assegnati ad una determinata categoria d'impatto, fino ad ottenere delle unità di misura comuni. La quantità in massa di ciascuna sostanza è moltiplicata per un fattore di caratterizzazione. La CO_2 è la sostanza di riferimento: il suo coefficiente di peso è 1 e i valori dell'indicatore sono espressi in $kgCO_{2eq}$;
2) *valutazione dei danni*: ha lo scopo di raggruppare una serie di indicatori di impatto in una categoria di danno;
3) *normalizzazione*: i valori ottenuti sono normalizzati e convertiti in un numero adimensionale. I valori normalizzati sono espressi in *punti*, che agevolano il confronto degli effetti del processo nelle diverse categorie di impatto;
4) *pesatura*: consiste nel moltiplicare gli indicatori delle categorie di impatto o danno per un fattore di peso. La somma fornisce un punteggio singolo, rappresentativo del processo e confrontabile con quello di altri processi.

3.1 Metodi di Valutazione degli Impatti e Codici di Calcolo

Eco-Indicator è un metodo di valutazione degli impatti ambientali che aggrega i risultati di LCA in grandezze o parametri facilmente comprensibili ed utilizzabili, chiamati *Eco-indicatori*. La metodologia raggruppa i risultati dei danni in tre categorie principali e calcola valori standard per i materiali considerati: *Human Health*, *Ecosystem Quality* e *Resources*.

Un altro metodo di valutazione dell'impatto del ciclo di vita è l'*IPCC 2007*. Il metodo quantifica le emissioni gassose in base al loro effetto sul riscaldamento globale, raggruppando le diverse tipologie di emissioni in categorie di impatto. Il tutto è governato dalla definizione dei potenziali di riscaldamento globale (GWP) per le diverse sostanze gassose, pubblicati dall'*IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)*.

Infine *CED 2001* valuta l'energia impiegata nel ciclo di vita di un prodotto grazie al procedimento della *Cumulative Energy Demand (CED)*. L'importanza nell'uso di tale metodo sta nel fatto che i risultati ottenuti consentono di individuare in quale fase del ciclo di vita è possibile evitare sprechi di energia. L'unità di misura adottata è il MJ_{eq}, che rappresenta l'energia impiegata suddivisa in cinque sub categorie o classi: fonti fossili, nucleare, biomasse, vento-sole-geotermia e acqua. Questo metodo non prevede operazioni di normalizzazione.

Il software scelto per sviluppare il lavoro è *SimaPro 7.0* e tra i 12 databases in esso inclusi è stato scelto *Ecoinvent Processes*. Il codice di calcolo include i metodi di valutazione sopra illustrati ed è organizzato in modo da seguire la fasi descritte nella norma UNI EN ISO 14040.

4. CASO DI STUDIO A CONFRONTO CON UNA COSTRUZIONE TRADIZIONALE

La finalità dello studio condotto è quella di valutare il ciclo di vita di un appartamento situato all'interno del primo edificio residenziale plurifamiliare in Umbria certificato CasaClima Classe A (Residenza Annamaria). Il passo successivo è il confronto con un appartamento virtualmente identico, avente stesse dimensioni e stessa ubicazione, ma differente stratigrafia dell'involucro edilizio.

Focalizzando l'attenzione sull'involucro (chiusure verticali, orizzontali, strutture opache ecc.) si è cercato di mettere in evidenza l'influenza in termini energetici ed economici di una scelta piuttosto che dell'altra e la possibilità, nella vita utile dell'edificio (50 anni), di compensare l'elevato gap di spesa energetica nella produzione di materiali ad alte prestazioni. Per l'applicazione della metodologia LCA sono state definiti (UNI EN ISO 14040):

a. campo di applicazione: l'edificio si sviluppa su due piani, per un totale di superficie netta riscaldata di 500 m^2 e di volume netto riscaldato di 1450 m^3 ;
b. unità funzionale: è stato scelto il lotto stesso, in modo da uniformare ad esso tutti i dati in input ed in output utili per il confronto diretto con altre tipologie costruttive;
c. confini del sistema: sono stati individuati gli elementi costitutivi dell'involucro dell'edificio oggetto di flussi di energia in ingresso e in uscita dal sistema;
d. fase di inventario dell'LCA: il sistema è stato scomposto nei suoi componenti specifici (parete esterna, parete tra appartamenti, parete del vano scala, infissi, solaio interpiano, solaio su garage, impianto di fornitura servizi per climatizzazione) per compilare con il massimo dettaglio ingressi ed uscite di materiali, energia e risorse;
e. fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita: sono state considerate le potenziali conseguenze ambientali, dirette ed indirette, associate ai suddetti input ed output;
f. fase di interpretazione dell'LCA.

4.1 LCI Fase di Assemblaggio: Confronto dell'Edificio Oggetto di Studio con l'Edificio Virtuale

Seguendo lo schema di classificazione della norma UNI 8290-1:1981+A122:1983 all'interno della classe di unità tecnologiche *chiusura (3.2)* è possibile individuare quattro unità tecnologiche: *chiusura verticale, chiusura orizzontale inferiore, chiusura orizzontale su spazi esterni* e *chiusura superiore* [3].

Di queste è valutata la prima unità che, per le ipotesi fatte, può far risaltare le differenze prestazionali ed energetiche dei due involucri. All'interno dell'unità tecnologica *chiusura verticale* sono presenti tre diverse stratigrafie di involucro: *parete esterna, parete del vano scala* e *parete tra appartamenti*.

4.1.1 Edificio oggetto di studio - Fase di Assemblaggio. Di seguito (Tabelle 1, 2 e 3) sono riportate le stratigrafie relative alle tre tipologie di sub-sistema *tamponatura verticale* dell'edificio oggetto di studio, con spessori e caratteristiche termofisiche di ogni materiale impiegato.

Tabella 1: Stratigrafia e caratteristiche termoisolanti della parete esterna (caso di studio)

Descrizione materiale	D [kg/m^3]	s [cm]	M [kg]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]
Strato liminare interno					0,130
Intonaco-Roccia Gambassi (perlite esp.)	1.000	2,0	1.672	0,340	0,059
Bricks-Poroton Blok 30/700 TS	893	30,0	17.456	0,148	2,028
Caparol Dalmatiner (pannello EPS)	25	14,0	222	0,035	4,000
Rasante Caparol	1.800	1,0	1.542	0,900	0,011
Strato liminare esterno					0,040
		s_{tot}	47,0		R_{tot} 6,268

Trasmittanza U [W/m^{2}K]	da calcolo	limite 2010 D.Lgs. 311
	0,160	**0,34**

Tabella 2: Stratigrafia e caratteristiche termoisolanti della parete tra appartamenti (caso di studio)

Descrizione materiale	D [kg/m^3]	s [cm]	M [kg]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]
Strato liminare interno					0,130
Malta di calce	1.800	1,5	1.467	0,900	0,017
Tavelle per divisori 6x15x30	594	6,0	1.876		0,130
Malta di cemento (rinzaffo)	2.000	1,0	1.026	1,400	0,007
Lecablock Bioclima Fonoisol. 25x20x25	1.083	25,0	6.579		1,000
Malta di cemento (rinzaffo)	2.000	1,0		1,400	0,007
Tavelle per divisori 6x15x30	594	6,0			0,130
Malta di calce	1.800	1,5		0,900	0,017
Strato liminare esterno (vs. altro appart.)					0,130
		s_{tot}	42,0		R_{tot} 1,568

Trasmittanza U [W/m^{2}K]	da calcolo	limite 2010 D.Lgs. 311
	0,638	**0,8**

Tabella 3: Stratigrafia e caratteristiche termoisolanti della parete del vano scala (caso di studio)

Descrizione materiale	D [kg/m^3]	s [cm]	M [kg]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]
Strato liminare interno					0,130
Malta di calce	1.800	1,5	847	0,900	0,017
Tavelle per divisori 6x15x30	594	6,0	1.010		0,130
Malta di cemento (rinzaffo)	2.000	1,0	1.080	1,400	0,007
Lecablock Bioclima Fonoisol. 25x20x25	1.083	25,0	7.456		1,000
Malta di cemento (rinzaffo)	2.000	1,0		1,400	0,007
Rockwool Acoustic 225 (lana di roccia)	70	8,0	159	0,035	2,286
Aria		4,0			0,110
Pannello cartongesso	750	1,2	244		0,021
Strato liminare esterno					0,040
		s_{tot}	47,7		R_{tot} 3,748

Trasmittanza U [W/m^{2}K]	da calcolo	limite 2010 D.Lgs. 311
	0,267	**0,34**

Altro sub-sistema considerato nell'unità tecnologica *chiusura verticale* è quello degli *infissi* (Tabella 4).

Tabella 4: Scheda tecnica degli infissi (caso di studio)

Infissi	N.	Gas	L [m]	H [m]	S_{vetro} [m^2]	S_{telaio} [m^2]	S [m^2]	M [kg]
Vetrata angolo	2	Krypton	2,52	2,41	9,58	2,56	12,146	239,50
Soggiorno piccola	1	Argon	1,22	2,31	1,85	0,97	2,818	46,25
Soggiorno grande	1	Argon	1,57	2,31	2,59	1,04	3,627	64,75
Cucina	1	Argon	0,92	2,31	1,47	0,63	2,125	36,75
Studio	1	Argon	1,57	1,31	1,35	0,71	2,057	33,75
Finestrelle	2	Argon	0,72	0,56	0,34	0,46	0,806	58,50

4.1.2 Edificio Virtuale (Fase di Assemblaggio). Nell'edificio virtuale sono state considerate stratigrafie differenti per la realizzazione delle tre tipologie di tamponature verticali, fermo restando il rispetto del D.Lgs. 311/06, ma considerando i limiti delle trasmittanze relativi all'anno 2006: si è infatti ipotizzato di simulare un edificio esistente realizzato mediante tecniche e componenti costruttivi tradizionali. Riguardo all'unità tecnologica *chiusura verticale* si riportano di seguito le stratigrafie virtuali realizzate, con relativo computo delle masse e delle proprietà termoisolanti (Tabelle 5, 6 e 7).

Tabella 5: Stratigrafia e caratteristiche termoisolanti della parete esterna virtuale

Descrizione materiale	D [kg/m^3]	s [cm]	M [kg]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]
Strato liminare interno					0,130
Intonaco-Roccia Gambassi (perlite esp.)	1.000	1,5	1.653	0,340	0,059
Forato 12x25x25	635	12,0	3.690	0,210	0,571
Rockwool pannello 211	40	4,0	1.042		1,100
Intonaco-Roccia Gambassi (perlite esp.)	1.000	1,5		0,340	0,059
Mattone faccia a vista	1.589	12,0	14.724	0,490	0,245
Strato liminare esterno					0,040
		s_{tot}	31,0		R_{tot} 2,204

Trasmittanza U [W/m^{2}K]	da calcolo	limite 2006 D.Lgs. 311
	0,454	**0,46**

Tabella 6: Stratigrafia e caratteristiche termoisolanti della parete tra appartamenti virtuale

Descrizione materiale	D [kg/m^3]	s [cm]	M [kg]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]
Strato liminare interno					0,130
Malta di calce	1.800	1,5	1.467	0,900	0,017
Tavelle per divisori 6x15x30	594	6,0	1.844		0,130
Malta di cemento (rinzaffo)	2.000	1,0	1.026	1,400	0,007
Forato fonoisolante 15x25x25	635	15,0	2.572	0,194	0,773
Malta di cemento (rinzaffo)	2.000	1,0		1,400	0,007
Tavelle per divisori 6x15x30	594	6,0			0,130
Malta di calce	1.800	1,5		0,900	0,017
Strato liminare esterno (vs. altro appart.)					0,130
		s_{tot}	32,0		R_{tot} 1,341

Trasmittanza U [W/m^{2}K]	da calcolo	limite 2006 D.Lgs. 311
	0,746	**0,8**

Tabella 7: Stratigrafia e caratteristiche termoisolanti della parete del vano scala virtuale

Descrizione materiale	D [kg/m^3]	s [cm]	M [kg]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]
Strato liminare interno					0,130
Malta di calce	1.800	1,5	985	0,900	0,017
Tavelle per divisori 6x15x30	594	6,0	1.216		0,130
Malta di cemento (rinzaffo)	2.000	1,0	1.242	1,400	0,007
Forato 10x25x25	600	10,0	1.871	0,285	1,000
Malta di cemento (rinzaffo)	2.000	1,0		1,400	0,007
Rockwool Acoustic 225 (lana di roccia)	70	5,0	96	0,035	1,429
Aria		4,0			0,110
Pannello cartongesso	750	1,2	244		0,021
Strato liminare esterno					0,040
		s_{tot} 29,7			R_{tot} 2,241

	da calcolo	limite 2006 D.Lgs. 311
Trasmittanza U [W/m^{2}K]	**0,446**	**0,46**

Gli infissi dell'edificio virtuale (Tabella 8) hanno le stesse dimensioni di quelli realmente esistenti, ma presentano una trasmittanza più alta (U residenza = 1,2 m^{2}K/W; U virtuale = 2,7 m^{2}K/W), sempre nel rispetto dei limiti di trasmittanza imposti dal D.Lgs. 311/06, pari a U = 2,8 m^{2}K/W all'anno 2006 (U = 2,2 m^{2}K/W nel 2010). Altra differenza è il tipo di vetro impiegato, con densità areale pari a 15 kg/m^2 anziché 25 kg/m^2 e decisamente meno prestante di quello basso emissivo.

Tabella 8: Scheda tecnica degli infissi virtuali

Infissi	N.	Gas	L [m]	H [m]	S_{vetro} [m^2]	S_{telaio} [m^2]	S [m^2]	M [kg]
Vetrata angolo	2	Aria	2,52	2,41	9,58	2,56	12,146	143,70
Soggiorno piccola	1	Aria	1,22	2,31	1,85	0,97	2,818	27,75
Soggiorno grande	1	Aria	1,57	2,31	2,59	1,04	3,627	38,85
Cucina	1	Aria	0,92	2,31	1,47	0,63	2,125	22,05
Studio	1	Aria	1,57	1,31	1,35	0,71	2,057	20,25
Finestrelle	2	Aria	0,72	0,56	0,34	0,46	0,806	35,10

4.2 LCA Fase Operativa

I consumi energetici dovuti alla fase operativa dipendono da vari fattori: tipologia di impianto di riscaldamento o raffrescamento, combustibile usato, qualità termoisolanti dell'involucro edilizio, ecc. Come fonte principale di riscaldamento è stata considerata una caldaia a condensazione da 30 kW, che usa come combustibile il metano, trascurando l'integrazione per il riscaldamento data dai pannelli solari installati sulla copertura della Residenza Annamaria. Confrontando i risultati del procedimento di valutazione del fabbisogno energetico per le due unità abitative, mediante foglio di calcolo *ProCasaClima*, la spesa annuale necessaria per riscaldamento per l'appartamento virtuale corrisponde al 326% di quella per il caso di studio (Tabella 9).

Tabella 9: Spese per il riscaldamento dell'involucro edilizio

Unità abitativa	Classe energetica	Fabbisogno specifico	Consumo di energia	Fabbisogno per unità	Spesa per riscaldamento
Resid. Annamaria	A	19 kWh/m^{2}a	10.397 MJ/a	2.888 kWh/a	202 €/a
Abitazione virtuale	C	62 kWh/m^{2}a	33.926 MJ/a	9.424 kWh/a	659 €/a

4.3 LCA Fase di Dismissione

Il database *Ecoinvent* del software *SimaPro 7.0* prevede un inventario specifico per lo smaltimento dei materiali da costruzione: all'interno di questo inventario si è provveduto a rintracciare i materiali impiegati o altri simili, in grado di approssimare quelli usati nella fase di costruzione degli edifici, per valutare il tipo di processo a cui sottoporli in fase di dismissione. Il database prevede tre diverse modalità di smaltimento di questo tipo di rifiuti: riciclaggio diretto, riciclaggio parziale previa selezione e separazione dei materiali idonei oppure deposizione in discarica senza riciclaggio (Figura 1).

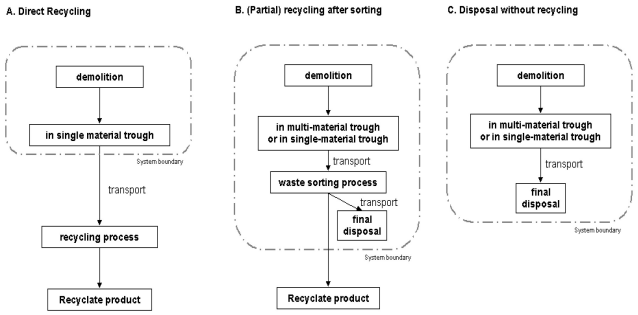


Figura 1: Possibili smaltimenti dei materiali

5. ANALISI DEI RISULTATI

Scopo dell'analisi effettuata è confrontare i risultati relativi alla valutazione del ciclo di vita dei due edifici per mezzo del software *SimaPro 7.0*, grazie all'uso dei tre metodi di calcolo *Eco-Indicator 99(H)*, *CED 2001* e *IPCC 2007*.

La valutazione è stata effettuata per le tre fasi della vita dell'edificio: assemblaggio, fase operativa e dismissione.

Gli impatti sono rappresentati con istogrammi adottando, come unità di misura il *Pt* (unità di punteggio): più alto è il valore, maggiore è il danno ambientale arrecato. Si identificano come unità A l'unità abitativa esaminata nella Residenza Annamaria e come unità B l'appartamento virtuale.

5.1 Fase di Assemblaggio

Eco-Indicator 99(H)

Sono stati valutati gli impatti su undici categorie di danno, poi raggruppate nelle tre categorie fondamentali (*Human Health, Ecosystem Quality* e *Resources*). Dagli istogrammi (Figura 2) è evidente che ciò che maggiormente influisce sulla valutazione globale risulta essere la categoria delle risorse (combustibili), seguita da quella della salute umana.

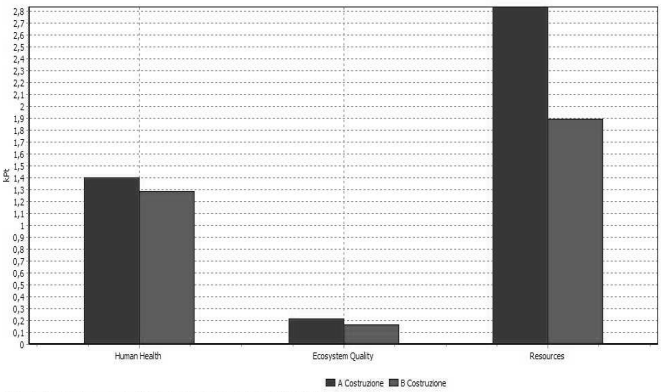


Figura 2: Eco-indicator: contributo delle due costruzioni alle categorie di danno

Nella categoria risorse, il contributo di danno generato nella fase di costruzione dell'unità A è superiore del 33,3% rispetto all'unità B, mentre per le altre categorie i punteggi sono paragonabili, anche se quelli della costruzione B sempre leggermente inferiori.

CED 2001

Dalla Figura 3 risulta chiaramente che i consumi di energia non rinnovabile da fonti fossili sono la massima parte in

entrambi i casi e ammontano rispettivamente all'84,6% (unità A) e all'80,1% (unità B) del totale.

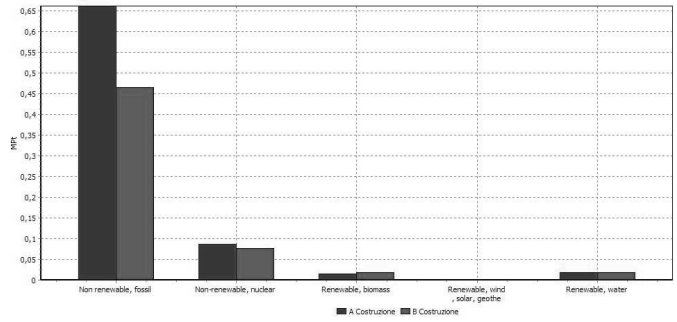


Figura 3: CED: fase costruttiva a confronto

IPCC 2007

Il confronto relativo alla fase realizzativa delle due tipologie edilizie evidenzia per l'unità A una produzione di $kgCO_{2eq}$ pari al 7,5% in più rispetto all'unità B (Figura 4).

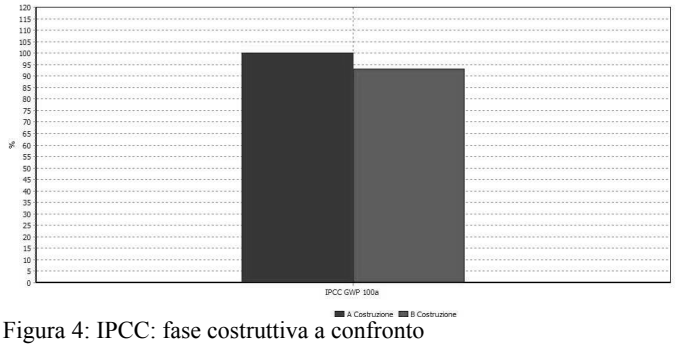


Figura 4: IPCC: fase costruttiva a confronto

5.2 Fase Operativa

Per tale fase sono stati considerati i valori dei consumi annui di gas calcolati in funzione del fabbisogno energetico.

Eco-Indicator 99(H)

Dagli istogrammi di Figura 5 è possibile notare come la concentrazione maggiore di danni causati appartenga alla categoria delle risorse. Il risultato evidenzia la netta prevalenza del danno sulle risorse naturali particolarmente nell'unità B, che supera l'unità A di circa 2,26 volte.

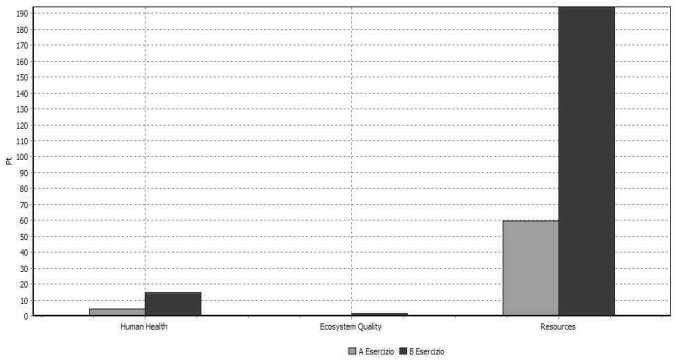


Figura 5: Eco-indicator: confronto della fase di esercizio

CED 2001

Valutando i consumi energetici, il metodo conferma il dato relativo ad *Eco-Indicator* con una differenza di richiesta di MJ_{eq} pari proprio al 226%, come evidente in Figura 6.

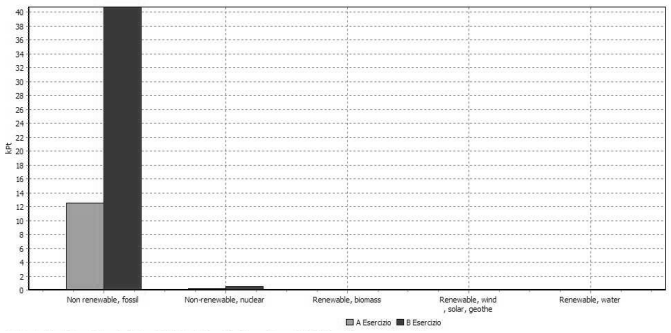


Figura 6: CED 2001: confronto della fase di esercizio

IPCC 2007

Impostando l'orizzonte temporale di valutazione in un arco di 100 anni, si è cercato di capire in che modo la fase di esercizio potesse influenzare il bilancio di emissioni nocive rispetto alle altre. Anche in questo caso si può notare (Figura 7) come l'emissione di $kgCO_{2eq}$ sia strettamente correlata con i risultati ottenuti applicando il metodo *CED*: le emissioni per l'unità B sono superiori del 226% rispetto all'unità A. La proporzionalità tra i risultati ottenuti è conseguenza del fatto che nella fase operativa i parametri esaminati dai tre metodi di valutazione sono funzione soltanto dei consumi annui di combustibile durante la vita utile delle unità abitative.

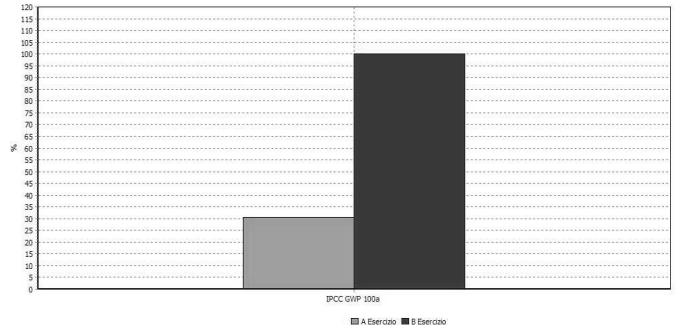


Figura 7: IPCC: confronto della fase di esercizio

5.3 Fase di Dismissione

Relativamente a questa fase del ciclo di vita dell'edificio si è provveduto a valutare l'impatto ambientale causato dalla demolizione della costruzione e dalla rimozione dei componenti non strutturali. Come detto in precedenza, per i materiali si è previsto, a seconda dei casi, il riciclaggio oppure il riciclaggio dopo la separazione da componenti inutilizzabili o la deposizione in discarica.

Eco-Indicator 99(H)

Si nota un capovolgimento dei valori dei danni provocati tra le due unità a confronto, ma soprattutto un netto calo dei danni arrecati alle risorse a scapito della salute umana (Figura 8). In termini percentuali si è osservata una stima del danno causato nella fase di dismissione dall'unità B più elevata di quella dell'unità A rispettivamente dell'11,2% nella categoria della salute umana, del 13,3% nella categoria della qualità dell'ecosistema e del 13,6% nella categoria delle risorse.

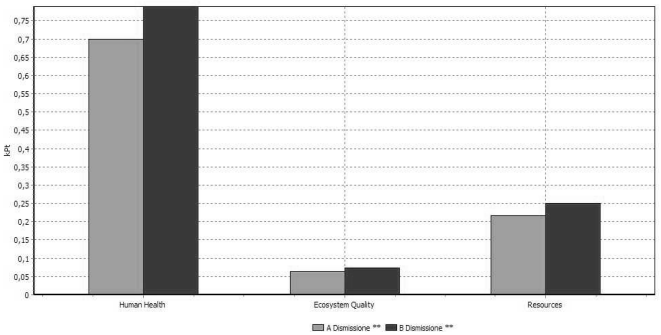


Figura 8: Eco-indicator: confronto della fase di dismissione

CED 2001

In Figura 9 è possibile notare come, nella fase finale della vita utile delle unità considerate, sia più dispendioso demolire o comunque dismettere un involucro tradizionale (B), meno prestazionale, rispetto ad un involucro all'avanguardia (A). Il dispendio di energia si concentra anche in questo caso nella categoria delle risorse fossili non rinnovabili, con una differenza percentuale del 7,3% in più per l'unità di tipo B.

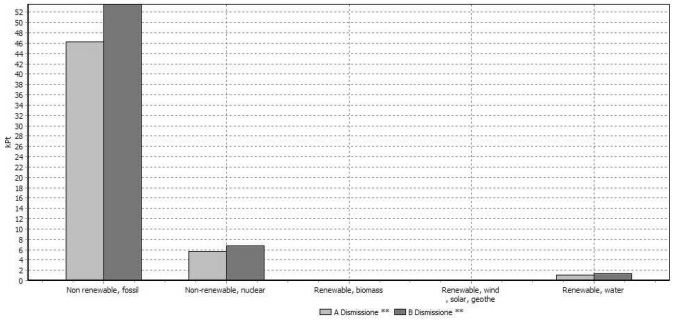


Figura 9. CED: confronto della fase di dismissione

IPCC 2007

Applicando anche al caso della dismissione il metodo di valutazione degli impatti in base ai $kgCO_{2eq}$ nell'arco temporale di 100 anni, si ottiene un risultato importante (Figura 10): la valutazione mette in risalto il maggiore inquinamento causato proprio da questo processo per la dismissione dell'involucro di tipo A. Il tutto è probabilmente riconducibile alla presenza, nella prima tipologia di involucro, di materiali termo-fono isolanti con caratteristiche chimiche e di composizione tale da provocare un maggiore impatto a livello di immissione di CO_2 nell'aria.

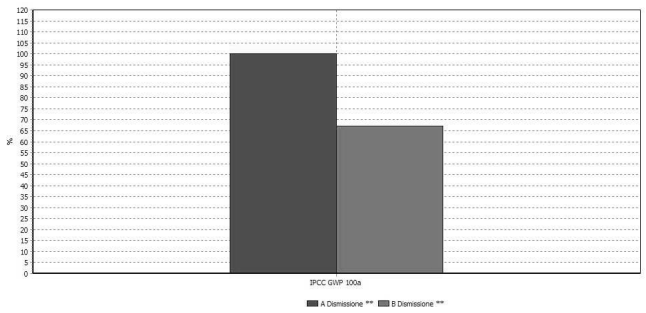


Figura 10. IPCC: confronto della fase di dismissione

6. CONCLUSIONI

Il metodo *Eco-Indicator* ha rivelato che l'impatto di danno della Residenza Annamaria supera del 33,3% quello relativo all'edificio virtuale nella fase di costruzione. A fronte di tale maggiore impatto, la differenza di fabbisogno energetico tra i due involucri si traduce in un netto eccesso di consumo di energia dell'involucro virtuale. Partendo dal fabbisogno energetico per ogni unità abitativa espresso in MJ, risulta evidente come l'involucro virtuale sia nettamente svantaggiato rispetto a quello reale. I calcoli sono stati condotti prendendo come dato iniziale il fabbisogno energetico ottenuto tramite il foglio di calcolo ProCasaClima (kWh/m^2anno). In seguito si è rapportato il fabbisogno annuo di energia dell'appartamento all'efficienza energetica del metano, pari a circa 10 kWh/m^3, ottenendo il quantitativo di combustibile necessario per il riscaldamento dell'involucro (288 m^3): la spesa richiesta per l'appartamento virtuale corrisponde al 326% di quella per la Residenza Annamaria.

Il metodo *IPCC* evidenzia come nella fase operativa (–1.691 $kgCO_{2eq}$/anno per l'unità A rispetto alla B) siano sufficienti soltanto 2,2 anni per recuperare il surplus di produzione di gas serra causato dalla costruzione dell'appartamento ad alte prestazioni (+3.752 $kgCO_{2eq}$) e 4 anni per ammortizzare il gap di emissioni dovuto ad entrambe le fasi di costruzione e dismissione (+6.761 $kgCO_{2eq}$). Facendo lo stesso tipo di confronto con il metodo *CED*, si evince che il tempo di recupero completo dell'eccesso di spesa energetica relativamente alla fase di assemblaggio dell'unità reale (+201.290 MJ_{eq} rispetto a quella virtuale) è di 7 anni di esercizio (–28.741 MJ_{eq}/anno per l'unità A rispetto alla B).

Considerando i $kgCO_{2eq}$ il risultato dell'indagine condotta col metodo *IPCC* per la fase di esercizio dei due involucri edilizi evidenzia come nel caso dell'unità ad elevate prestazioni la quantità di CO_2 emessa nella fase utile di vita sia di 6,38 $kgCO_{2eq}/m^2$, contro i 20,8 $kgCO_{2eq}/m^2$ dell'unità virtuale (Δ = –14,4 $kgCO_{2eq}/m^2$, pari al 69% in meno rispetto alla costruzione tradizionale simulata) [4].

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. ISO/TR 14025, Etichette e dichiarazioni ambientali di Tipo III, 2000;
2. G. Beccali, et al., La Termotecnica, *Analisi del ciclo di vita di un laterizio porizzato*, Gennaio/Febbraio 2009;
3. UNI 8290-1, *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico.Classificazione e terminologia*, 01/09/1981;
4. A. Gagliardi, Analisi del ciclo di vita e dichiarazione ambientale di prodotto. Applicazione ad un edificio residenziale ad elevate prestazioni, tesi di laurea, facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, 2009.

PRESTAZIONI DI DIFFERENTI STRATEGIE DI VENTILAZIONE E DI SISTEMI DI SCHERMATURA SOLARE PER EDIFICI RESIDENZIALI IN AREA MEDITERRANEA.

Sciurpi Fabio , Carletti Cristina, Pierangioli Leone

Dipartimento di Tecnologie dell'Architettura e Design P. Spadolini, via S. Niccolò 93, Firenze

SOMMARIO

La recente evoluzione della legislazione e della normativa nel nostro Paese impone una revisione globale delle strategie progettuali e di valutazione degli edifici. In particolare il momento della valutazione, sia su progetto preliminare che definitivo, necessita di un doppio livello di verifica, sia in regime stazionario secondo quanto richiesto del D.lgs 311/06 e s.m.i. che dinamico. In particolare, a fianco delle obbligatorie verifiche, la valutazione dinamica delle prestazioni in regime invernale e soprattutto estivo dell'edificio può risultare strategica al fine di valutare la possibilità di implementare scelte progettuali difficilmente valutabili con sistemi stazionari.

La memoria, in particolare, analizza alcune delle potenzialità di uno dei più utilizzati codici di calcolo in regime dinamico per quanto attiene la valutazione e comparazione di scelte quali: l'utilizzo della ventilazione passante e per effetto camino, l'uso di differenti sistemi di schermatura, ecc.

INTRODUZIONE

La recente evoluzione della legislazione e della normativa nel nostro Paese in materia di contenimento dei consumi energetici impone una revisione globale delle strategie progettuali e di valutazione degli edifici.

Sebbene siano ormai note da tempo le procedure necessarie alla valutazione energetica degli edifici, si rileva come le importanti verifiche richieste sul progetto richiedano una maggiore assunzione di responsabilità e maggiore consapevolezza fino dalle prime fasi progettuali.

In particolare, risulta oltremodo strategico impostare anche verifiche che permettano di comprendere, in determinate condizioni al contorno, il comportamento dell'edificio nella sua globalità e di elementi particolari quali schermature e sistemi di ventilazione.

Per ottemperare a queste nuove necessità, il momento della valutazione, sia su progetto preliminare che definitivo, necessita di un doppio livello di verifica, sia in regime stazionario secondo quanto richiesto del D.Lgs 311/06 e s.m.i. che dinamico. In particolare, la valutazione dinamica delle prestazioni in regime invernale ed estivo dell'edificio può risultare strategica al fine di valutare la possibilità di implementare scelte progettuali difficilmente valutabili con sistemi stazionari[1].

LA VALUTAZIONE DEL PROGETTO

Le verifiche prestazionali su progetto richieste al progettista richiedono diversi step:

- una verifica dei pacchetti di involucro e dei sistemi di controllo della radiazione solare;
- una verifica dell'involucro nella sua globalità;
- una verifica del sistema edificio impianto (climatizzazione);
- una verifica dei sistemi di ventilazione.

Nell'ottica di un processo di verifica prestazionale aperto, in cui nella fase preliminare sia possibile implementare le prestazioni di un elemento al fine di raggiungere gli obiettivi energetici finali, è opportuno individuare gli indicatori prestazionali cui fare riferimento [2].

La normativa vigente fornisce gli indicatori prestazionali che il progettista può utilizzare nel processo di verifica confrontandoli con valori limite considerati accettabili.

In primo luogo la verifica verte sul comportamento delle strutture disperdenti dell'involucro in termini di trasmittanza ed inerzia termica. Tale verifica non è affatto trascurabile, perché impone scelte operative importanti sul comportamento futuro in regime stazionario e dinamico dell'edificio e pone il progettista davanti a scelte oggi importanti, quali ad esempio l'utilizzo di una struttura pesante (per esempio in blocchi di laterizio) o leggera (ad esempio in legno).

Tali scelte influenzano, come noto, anche la tenuta all'aria dell'edificio che è fondamentale quando il target di prestazione si attesti a valori estremamente contenuti.

Un altro elemento estremamente interessante è la valutazione del comportamento dei sistemi schermanti che può essere determinante per il controllo del fabbisogno estivo dell'edificio e delle condizioni di benessere interno limitando l'uso di eventuali sistemi di climatizzazione attiva soprattutto in clima mediterraneo.

Nella valutazione del comportamento estivo dell'edificio, infine, assume una importanza rilevante lo studio puntuale di differenti sistemi di ventilazione naturale e ibrida che possono contribuire a limitare notevolmente i consumi per raffresca mento.

Ognuna di queste principali verifiche è supportata da opportune procedure ed algoritmi che permettono al

progettista di confrontare i risultati ottenuti con quelli riportati nella legislazione vigente.

Una riflessione maggiormente approfondita deve essere fatta sulla scelta dei sistemi di ventilazione naturale perché implicano l'adozione di codici di calcolo che lavorano in regime dinamico e che non sempre sono utilizzati dai progettisti architettonici [3],[4].

Un codice di calcolo che riesce a fornire indicazioni molto utili soprattutto per la scelta delle strategie di ventilazione è Design Builder.

Tale codice è stato utilizzato per simulare le prestazioni energetiche di un edificio monofamiliare a Firenze e confrontare i risultati per valutare l'opportunità di scegliere alcuni sistemi di ventilazione al fine di contenere il fabbisogni energetici in regime estivo dell'edificio.

Il software utilizzato si presenta come un'interfaccia grafica progettata per implementare il codice di calcolo Energy Plus, rendendone più semplice e immediato l'utilizzo. Energy Plus è un codice di calcolo modulare che costituisce un sistema integrato di simulazione del comportamento termico delle strutture e del comportamento energetico dei sistemi impiantistici dell'edificio.

Energy Plus risolve il bilancio termico dell'edificio con una scansione temporale variabile fra 1 step all'ora e 1 step al minuto sulla base di un file climatico con scansione sub-oraria del tipo TRY. Il calcolo iterativo con intervalli ravvicinati permette di simulare la risposta dinamica delle masse dell'edificio e i fenomeni di inerzia termica connessi.

Energy Plus integra il sottomodulo di calcolo AFN (Air Flow Network) che ha permesso di simulare le portate dei flussi di ventilazione naturale attraverso le diverse zone termiche. Questa possibilità di calcolo è determinante per valutare con adeguata precisione l'efficacia di sistemi e strategie di ventilazione naturale alternative.

L'uso di Design Builder si può collocare nella fase preliminare dell'iter progettuale. La metodologia con cui è stata sviluppata l'analisi dell'edificio in oggetto, prevede che, una volta definite e verificate le caratteristiche tecnologiche delle singole strutture disperdenti dell'involucro, si proceda alla verifica dell'involucro nella sua globalità e alla successiva implementazione dei sistemi schermanti e delle strategie di ventilazione.

In particolare la verifica è stata condotta seguendo la struttura applicativa tipica di Design Builder che si articola nelle seguenti sezioni:

Editing dell'edificio - sezione "Layout". In questa sezione è stato modellato, mediante un'interfaccia di disegno tridimensionale tipo CAD, la struttura morfologica dell'edificio definendo le misure e la geometria dell'involucro, gli spessori delle chiusure perimetrali, spessori e posizione delle partizioni interne e posizione e dimensioni degli infissi interni ed esterni e delle bocchette di ventilazione. E' in questa sezione che nella fase di implementazione delle schermature sono stati aggiunti gli aggetti della copertura sul fronte Sud dell'edificio.

Editing dell'edificio - sezione "Activity". In questa sezione sono stati definiti gli apporti di calore gratuiti interni derivanti dai valori di occupazione e dal tipo di attività svolta.

Editing dell'edificio - sezione "Construction". Sono state immesse nel software le caratteristiche tecnologiche degli elementi costruttivi dell'edificio definendo le caratteristiche termiche dei materiali costituenti i diversi strati funzionali.

Editing dell'edificio - sezione "Openings". Questa sezione è stata utilizzata nella fase di verifica dell'involucro per definire le caratteristiche tecnologiche degli infissi. Nella fase di implementazione dei sistemi schermanti e delle strategie di ventilazione sono state inserite le caratteristiche delle schermature mobili interne (tende) e della schermatura esterna della finestra ad Ovest e sono state determinate le superfici e l'orario di apertura degli infissi perimetrali e della bocchetta per la ventilazione naturale presente nel torrino di estrazione posto sulla copertura.

Editing dell'edificio - sezione "HVAC". Qui sono presenti le opzioni che hanno permesso di selezionare il sistema di ventilazione da simulare scegliendo fra ventilazione naturale e VMC con o senza recupero di calore.

Simulazione. Nella fase conclusiva è stato impostato il periodo temporale e la scansione temporale per la simulazione. Una volta conclusa la fase di calcolo automatico si accede alla sezione dei risultati da cui sono stati ricavati ed esportati i dati stagionali relativi a EPi,invol e EPe,invol.

DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO CAMPIONE

L'edificio oggetto dello studio è un edificio in legno collocato a Firenze.

Le condizioni climatiche utilizzate nella simulazione sono riportate nella tabella 1 che segue.

Tabella 1: Condizioni al contorno utilizzate nella simulazione

Località	Firenze
Zona climatica	D
Periodo di riscaldamento	Dal 1° Novembre al 14 Aprile
Periodo di raffrescamento	Dal 1° Giugno al 31 Ottobre
Temperatura interna (stagione riscaldamento)	20°C
Temperatura interna (stagione raffrescamento)	26°C
Temperatura del terreno (a 0,5 m di profondità)	14°C
File climatico	ITA_Firenze-Peretola-IGDG

L'edifico oggetto della simulazione è una abitazione monofamiliare composta da ingresso (non riscaldato), cucina, soggiorno, disimpegno, camera matrimoniale, camera singola e bagno per una superficie utile pari a 73,49 m2 (tabella 2). Addossata al lato est dell'edifico si trova l'autorimessa.

Tabella 2: Descrizione ambienti edificio

Ambiente Riscaldato	Superficie (m2)
Cucina	14,4
Soggiorno	21,2
Camera matrimoniale	17,46
Camera singola	11,94
Disimpegno	2,78
Bagno	5,71
Superficie utile globale	*73,49*

L'edificio è realizzato con pareti in legno strutturale dotate di isolamento a cappotto, copertura ventilata con struttura in legno e solaio a terra isolato realizzato in laterocemento su spazio aerato (tabella 3).

Tabella 3: Descrizione componenti edificio

Componente	Trasmittanza (W/m2K)	Spessore totale (m)
Parete esterna verticale	0,22	0,47
Copertura ventilata	0,22	0,31
Solaio a terra	0,23	1,25
Componenti finestrati (vetrocamera basso em.)	2,4	-

Le specifiche caratteristiche relative ai componenti dell'involucro sono riportate nelle tabelle 4, 5 e 6.

Tabella 4: Composizione dell'involucro dell'edificio – parete verticale

Materiale (dall'est.)	λ (W/mK)	c (J/kgK	ρ (kg/m3)	s (m)
1.Intonaco di gesso	0.40	1000	1000	0,005
2.Lana di roccia	0.038	840	40	0,10
3. Pannello strutt. X-LAM	0.15	1420	700	0,10
4. Pannello lana di legno min. legata con cemento Portland	0.065	2100	327	0,05
5.Intercap. non vent.	0.30	1000	1	0,085
6.Lastra di gesso rivestito	0.21	840	900	0,025

Tabella 5: Composizione dell'involucro dell'edificio – copertura

Materiale (dall'est.)	λ (W/mK)	c (J/kgK)	ρ (kg/m3)	s (m)
7. Manto di copertura	1,00	800	2000	0,01
8. Intercapedine ventilata	0,30	1000	1	0,07
9. Pannello isolante in EPS	0,04	1400	15	0,07
10. Pannello in lana di legno	0,050	2100	200	0,11
11. Pannello OSB	0,13	1700	650	0,03
12. Pianelle in cotto	0,72	840	1800	0,02

Tabella 6: Composizione dell'involucro dell'edificio – solaio a terra

Materiale (dall'est.)	λ (W/mK)	c (J/kgK)	ρ (kg/m3)	s (m)
Terreno	1,21	840	1960	0,50
13. Intercapedine ventilata	0,30	1000	1	0,30
14. Solaio in latero-cemento	0,07	840	1450	0,24
15. Isolante in polistirene	0,035	1400	25	0,10
16. Massetto alleggerito	0,310	920	1000	0,09
17.Pavimento	0,72	840	1800	0,02

La planimetria dell'edificio è riportata nella figura 1.

I particolari della struttura e la sezione tipo sono riportati nelle figure 2 e 3 che seguono.

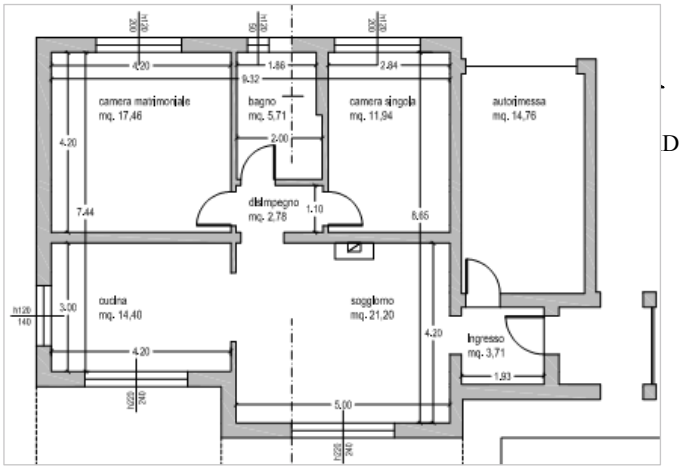


Figura 1: Planimetria dell'edificio (progetto architettonico Arch. A. Panichi)

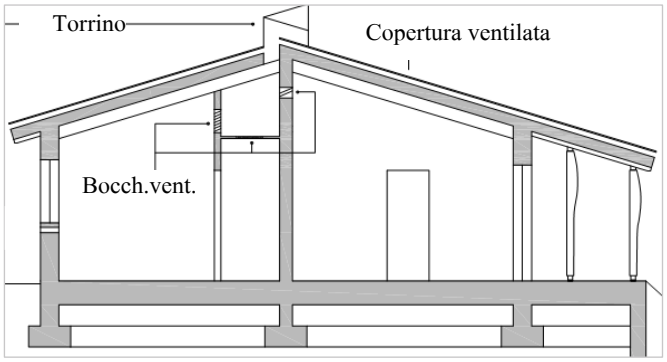


Figura 2: Sezione generale dell'edificio

RISULTATI DELLE SIMULAZIONI IN REGIME DINAMICO

Particolarmente interessanti sono le simulazioni condotte in regime dinamico nelle quali sono state ipotizzate differenti strategie di ventilazione e sistemi di schermatura.

Al fine di valutare il comportamento dell'edificio in regime invernale, per quanto attiene la ventilazione sono state ipotizzate sia una ventilazione naturale che garantisse 0,3 vol/h priva di recupero del calore (VENT 1), in conformità con la UNI TS 11300-I, sia una ventilazione meccanica controllata (VMC) che permettesse l'introduzione di un recuperatore di calore con efficienza pari al 70% (VENT 2).

Per la valutazione del comportamento in regime estivo, è stato ipotizzato un sistema di ventilazione passante notturna con apertura del 20% della superficie degli infissi fra le 20.00 e le 10.00 (VENT 3) ed una ventilazione notturna passante (con le specifiche di cui sopra) associata ad una ventilazione ad effetto camino (VENT 4). Quest'ultima è resa possibile dall'apertura di una bocchetta in un torrino di ventilazione posto sulla copertura dell'edificio; tale bocchetta viene aperta sempre dalle 20.00 alle 10.00.

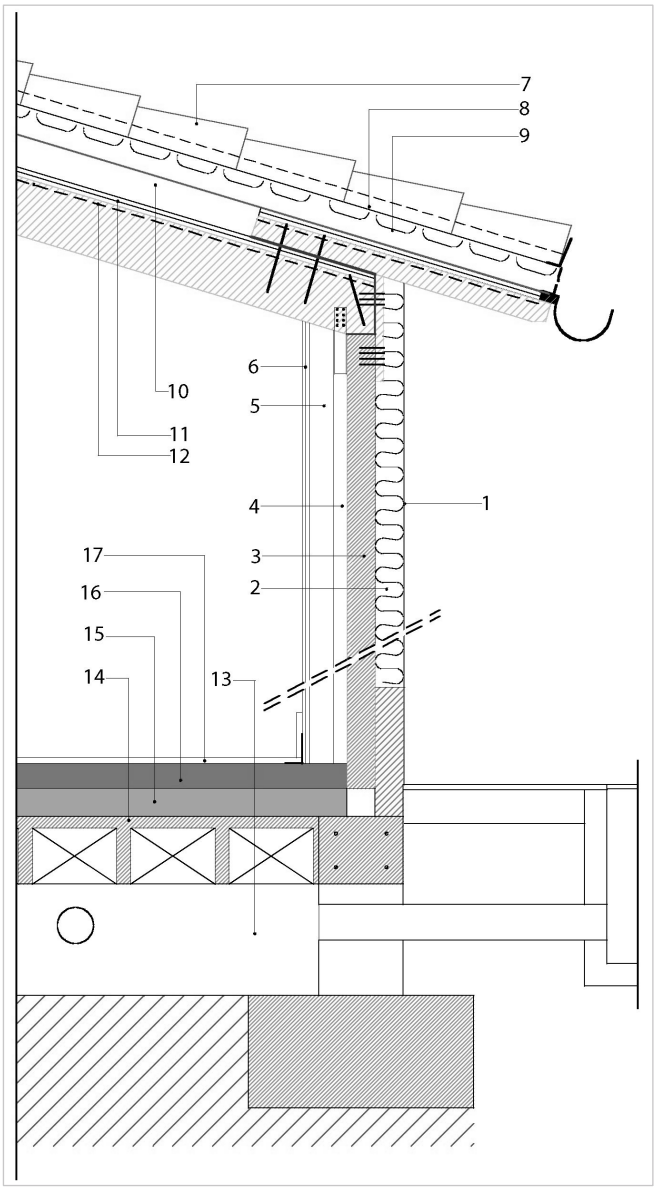


Figura 3: Sezione dell'edificio (particolare della stratigrafia). I riferimenti numerici sono quelli associati ai materiali riportati nelle tabelle 4, 5 e 6.

I risultati delle simulazioni condotte sono riportati nella tabella 7.

Tabella 7: Confronto dei sistemi di ventilazione: risultati delle simulazioni

Sistema di ventilazione	Fabbisogno per climatizzazione (kWh/m2 anno)
VENT 1	51,36 (EPi,invol)
VENT 2	38,64 (EPi,invol)
VENT 3	11,39 (EPe,invol)
VENT 4	9,76 (EPe,invol)

Per quanto attiene alle strategie di schermatura sono state ipotizzate alcune conformazioni associate alle strategie di ventilazione VEN 1, VENT 3 e VENT 4.

In particolare, si riportano i risultati delle simulazioni condotte utilizzando come sistema ombreggiante una tenda chiara posta in posizione interna (OMB 1) ed associando tale tendaggio con un sistema di ombreggiamento fisso costituito da un aggetto orizzontale di profondità paria a un metro sulle finestre esposte a sud associato ad un aggetto verticale laterale e superiore di profondità pari a 1 m sulle finestre esposte ad ovest (OMB 2) (tabella 8).

Tabella 8: Confronto dei sistemi di schermatura: risultati delle simulazioni

Sistema di schermatura	Fabbisogno per climatizzazione EPe,invol (kWh/m2 anno)
VENT 1 + OMB 1	35,76
VENT 1 + OMB 2	20,61
VENT 3 + OMB 1	8,62
VENT 3 + OMB 2	4,06
VENT 4 + OMB 1	7,48
VENT 4 + OMB 2	3,31

Nelle figure 4 e 5 sono riportati i modelli dell'edificio analizzato sul codice di calcolo utilizzato.

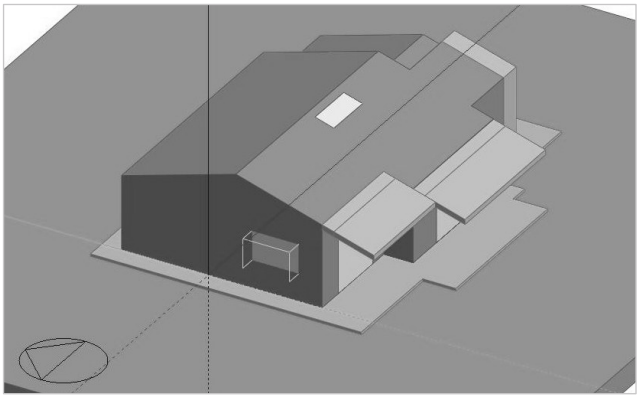


Figura 4: Modello dell'edifico su DB

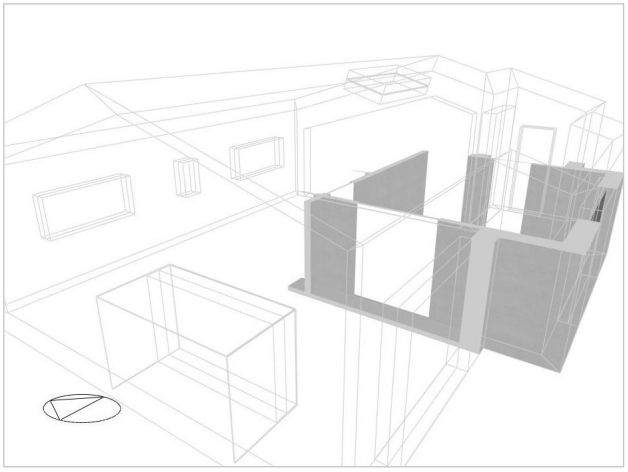


Figura 5: Modello dell'edifico su DB (particolare della modellazione degli ambienti interni)

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

I risultati delle simulazioni condotte dimostrano l'efficacia, in termini di riduzione del fabbisogno per la climatizzazione riferito all'involucro, di differenti strategie di ventilazione e schermatura.

In linea con le indicazioni contenute nei recenti Decreti attuativi del D.Lgs 311/06 e le norme UNI vigenti, si dimostra come una progettazione integrata riesca ad abbattere i fabbisogni energetici, in questo caso specifico, estivi con relativamente semplici accorgimenti progettuali che devono tuttavia essere valutati con opportuni strumenti di verifica nella fase preliminare della progettazione.

L'utilizzo di codici di calcolo quali Design Builder può costituire un valido ausilio nelle progettazione di questi sistemi che altrimenti non possono essere valutati in termini di efficacia energetica.

In regime invernale, il semplice utilizzo di un recuperatore di calore con efficienza di recupero sull'aria esausta pari al 70% abbinato ad un sistema di VMC può consentire una riduzione del fabbisogno per riscaldamento del 25%.

In regime estivo associare alla ventilazione passante un elemento architettonico che consenta l'effetto camino in regime notturno può ridurre il fabbisogno del 15%.

Sempre in regime estivo, l'utilizzo di sistemi schermanti esterni, abbinati a semplici tendaggi interni, può ridurre il fabbisogno in maniera notevolissima (tabella 8) quando opportunamente progettati.

CONCLUSIONI

Le recenti modificazioni della legislazione vigente e della normativa ad essa connessa comportano necessariamente una revisione di modelli progettuali che fino ad oggi sono stati adottati anche nella progettazione dell'edilizia residenziale.

Gli indicatori prestazionali oggi utilizzati sono sia indicatori riferiti al componente (opaco e finestrato) che a nuovi componenti dell'involucro quali i sistemi schermanti.

Il confronto delle prestazioni di differenti componenti risulta spesso facilitato quando è possibile associare alla valutazione in regime stazionario, secondo le norme UNI 11300 parte I e II, una valutazione in regime dinamico.

L'elemento su cui riflettere maggiormente è che lo strumento di calcolo non può sostituire in nessun momento del processo progettuale la scelta compositiva del progettista ma solo affiancarlo nei momenti decisionali critici al fine di comprovare l'efficacia di talune scelte rispetto ad altre.

La validità di alcune scelte progettuali nei confronti della riduzione del fabbisogno per la climatizzazione estiva (EPe, invol) è comprovato nella memoria dalla simulazione di un sistema di ventilazione passante, che presuppone una progettazione che recuperi il doppio affaccio negli edifici residenziali, o della ventilazione per effetto camino, che recupera elementi della memoria progettuale ormai perduti nel linguaggio contemporaneo.

Peraltro, l'uso di sistemi schermanti mobili o fissi, che possono ridurre fortemente i fabbisogni estivi se opportunamente dimensionati in funzione dell'orientamento delle aperture, necessariamente ha un effetto sulla percezione dell'involucro.

L'uso di codici di calcolo che lavorano in regime dinamico e che sia affiancano a quelli in regime stazionario, dunque, non deve essere veduto dal progettista architettonico come uno sterile esercizio di valutazione numerica bensì un valido aiuto di dimensionamento della reale efficacia di certe scelte architettoniche complesse, schermature, ventilazione ibrida, ecc. che altrimenti rischiano di restare solo delle ipotesi senza alcuna fondatezza scientifica.

BIBLIOGRAFIA

1. D.Lgs. n.192 del 19 agosto 2005, “Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia” e sue modifiche ed integrazioni.
2. UNI/TS 11300-1:2008 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
3. F. Sciurpi, C. Carletti, F. Asdrubali, G. Baldinelli, “Analisi e confronto di codici di calcolo esistenti per la valutazione energetica degli edifici, Convegno AICARR “Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto”, Bologna-Torino-Napoli 2008-2009.
4. F. Asdrubali, G. Baldinelli, F. Bianchi, F. Sciurpi, C. Carletti: “Confronto tra codici di calcolo dinamici e stazionari per la valutazione energetica degli edifici”, 47° Congresso Internazionale AICARR, Tivoli 8-9 ottobre 2009.

DALLO STUDIO DEL PROCESSO EDILIZIO ALLA DETERMINAZIONE DELLE LINEE GUIDA PER UNA PROGETTAZIONE ECO-SOSTENIBILE: UN CASO STUDIO

G. Cannistraro[1], C.Staiti[1] D. Germanò[1], D. Plutino[1] , M.Castelluccio[1]

[1]Dipertimento di Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria, Università di Messina, Contrada Papardo, Salita di Dio, 98100, Messina, Italy

SOMMARIO

Il presente studio si articola in una prima indagine sullo stato dell'arte, si illustreranno tutti i fattori di sostenibilità nell'ambiente costruito nonché il quadro normativo di riferimento, ovvero si porrà l'accento sulla necessità di un approccio "multidisciplinare" che riconosca la complessità del processo di progettazione che comporta la messa a sistema di tutti gli aspetti ambientali, sociali ed economici coinvolti per giungere alla definizione di un linguaggio e di obiettivi comuni a tutti gli operatori del processo.

Successivamente si individueranno le problematiche, i limiti e le implicazioni della normativa edilizia e dei Protocolli esistenti (strumenti ancora di difficile impiego ed utilizzo), l'obiettivo sarà centrato sul processo edilizio "consapevole" ed appropriato per l'edilizia energicamente efficiente attraverso l'introduzione, la diffusione e la conoscenza di tecnologie e materiali "coerenti".

Tutto ciò ci porterà alla fase finale del "processo edilizio" (programmazione, progettazione, esecuzione e manutenzione). I risultati previsti sono quelli di fornire delle possibili Linee Guida, che si articoleranno attraverso delle schede di valutazione applicate a dei casi studio, al fine di poter attuare una progettazione eco-sostenibile.

INTRODUZIONE

Per raggiungere una concreta sostenibilità del processo edilizio bisogna considerare tre fattori fondamentali: ambientale, tecnologico, economico.

Inizialmente è necessario considerare le opportunità offerte da azioni promosse a difesa dell'ambiente e ricercare soluzione progettuali realizzate in grado di migliorare le prestazioni del sistema edificio-impianto, considerando i costi di gestione all'interno di una logica di mercato che premia l'efficienza e la qualità.

Affinché si possa avviare un processo di sostenibilità della gestione della residenza è necessario adottare nuovi criteri di progettazione interdisciplinari che, nell'insieme, potrebbero consentire di risparmiare fino al 70% dell'energia legata al costruire e all'abitare. La necessità di ridurre i consumi energetici del cambiamento climatico, della sicurezza e dell'approvvigionamento di energia ha indotto la comunità europea a emanare la direttiva 2002/91/CE.

Il presente lavoro si propone di individuare una *metodologia specifica* per la determinazione delle linee guida al fine di operare una progettazione eco-sostenibile e di valutazione energetico-ambientale di un edificio. Questa metodologia è stata successivamente applicata ad un caso studio.

1. NORMATIVA SULL'EFFICIENZA ENERGETICA

La Direttiva 2002/91/CE pone gli aspetti fondamentali per il raggiungimento di un elevato rendimento energetico degli edifici. Tale Direttiva è stata recepita nel quadro normativo italiano con il D. Lgs. 192/2005 successivamente corretto ed integrato dal D. Lgs. 311/2006, all'interno dei quali si stabiliscono i criteri generali di calcolo e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo e l'integrazione delle fonti rinnovabili dell'*allegato I* [1], sancendo l'obbligatorietà di rispettare i limiti imposti in relazione a:

- **EP** [indice di prestazione energetica *limite* determinato in base al *fattore di forma* (S/V) dell'edificio e ai *gradi-giorno* (G.G.) della zona climatica];
- η_g [rendimento globale medio stagionale dell'impianto espresso in %];
- **U** [trasmittanza termica degli elementi che costituiscono l'involucro edilizio espresso in è W/m² K].

Nel rispetto del suddetto D. Lgs., la *trasmittanza* viene calcolata in relazione alle caratteristiche della tipologia dell'involucro oggetto di studio verificando che non superi il 30% dei valori riportati nelle tabelle dell'*allegato C*. [2]

Inoltre, dell'*allegato I*, nel caso di nuove costruzioni, si stabilisce che l'impianto di produzione di energia termica sia progettato in modo da coprire il 50% del fabbisogno di acqua calda sanitaria (acs) con fonti rinnovabili e l'obbligatorietà di installazione di panelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica.

2. "PROCESSO EDILIZIO" PROPOSTO NEL CASO DI STRUTTURE ESISTENTI

Per un *processo edilizio a basso impatto ambientale* bisogna pianificare e gestire le sue diverse fasi, coordinando le attività dei diversi soggetti coinvolti, nella logica della sostenibilità e della tutela ambientale. Quindi il processo edilizio che ne consegue è definibile come *la sequenza*

organizzata di "fasi operative" distinte, ma correlate tra loro, finalizzate alla realizzazione di un prodotto.

Pertanto esso è conseguibile attraverso:

1. programmazione;
2. progettazione;
3. esecuzione;
4. manutenzione.

La programmazione è una fase preliminare indispensabile al fine di stabilire le linee guida da seguire pedissequamente nella successiva fase progettuale. La qualità edilizia è la misura del grado di rispondenza delle prestazioni del sistema edilizio-impianto ai requisiti ambientali e tecnologici che ne hanno guidato la progettazione e la esecuzione. La fase manutentiva è, naturalmente, indispensabile affinché nel tempo il sistema edificio-impianto continui a mantenere il grado prestazionale precedentemente conseguito.

Le prescrizioni relative al sistema edilizio-impianto hanno l'obiettivo di garantire la qualità delle costruzioni in relazione alle esigenze degli utilizzatori. Pertanto l'attività di progettazione mette in continua relazione tre fattori fondamentali:

ESIGENZE –REQUISITI –PRESTAZIONI.

L'insieme strutturato di unità tecnologiche o di elementi tecnici, rispettivamente secondo la fase operativa meta progettuale del processo edilizio, determina il *sistema tecnologico* definito dalla norma UNI 7867 parte IV, mentre la classificazione del sistema tecnologico avviene secondo i criteri espressi nella norma UNI 8290 Parte I [3]. Quest'ultima benché riferita all'edilizia residenziale, è concettualmente estendibile ad organismi edilizi di altre destinazioni d'uso. La concezione normativa su base esigenziale-prestazionale presuppone una precisa individuazione degli elementi a cui applicare le norme.

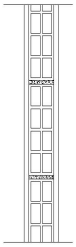
Il sistema tecnologico (o meglio ogni suo sub-sistema o parte dell'edificio) è caratterizzato da un insieme di requisiti che lo connotano e che devono guidare la progettazione delle varie soluzioni relative all'intervento. Per ogni sub-sistema (per es. le chiusure verticali), vengono determinati pacchetti di parti funzionali (in genere strati), caratterizzati dall'accentuazione di alcuni requisiti (es. lo strato portante, lo strato termo-isolante, ecc.). Da quanto detto si propongono delle *schede tipo* delle soluzioni tecnologiche proposte, che al contempo analizzano sia la configurazione stratigrafica dello stato di fatto, sia alcune soluzioni tecnologiche alternative volte al miglioramento delle prestazioni energetiche ambientali.

Le schede sono strutturate per *unità tecnologiche* (es. strutture portanti), *classi di elementi tecnici* (es. strutture di elevazione verticale), *elementi tecnici* (es. muratura in laterizio).

Seguirà la descrizione dell'elemento tecnico e saranno valutati anche gli aspetti prestazionali nonché lo stato di conservazione al quale seguiranno dei parametri numerici che misurano il criterio di valutazione. L'intervento di adeguamento dovrà fare riferimento alla normativa vigente; l'adeguamento valuterà sia l'aspetto sia normativo che prestazionale.

Inoltre in alcune delle *schede tipo* da noi proposte si aggiungono i dati relative a soluzioni tecnologiche per l'efficienza energetica del sistema edificio-impianto: *integrazioni con fonti energetiche rinnovabili, risoluzione dei ponti termici, sistemi di controllo solare.* Di seguito si riporta una delle nostre suddette *schede tipo.*

1	Chisura	Pareti perimetrali verticali
Cod.	Parete di tamponamento in laterizio	



Trasmittanza massima nel 2008	U = 0,54 W/m²K
Trasmittanza massima nel 2010	U = 0,48 W/m²K
Trasmittanza della struttura	U = 0,93 W/m²K

Descrizione e stato di conservazione	Classi esigenziali	
La parete è costituita da uno strato di intonaco esterno di cm. 2 da forati di cm. 30 e da uno strato di intonaco interno di cm.2. Dall'esame termografico si evidenzia la non continuità di isolamento; questo ù comporta perdite di calore e perdita di comfort interno, inoltre si evidenziano ponti termici nei punti deboli dell'involucro, intorno ai balconi e alle finestre.	Benessere	- microclimatico (comfort estivo/invernale,controllo della ventilazione naturale) - visivo (controllo illuminazione naturale: flusso luminoso e trasparenza) - Acustico
	Salvaguardia dell'ambiente	- Risparmio energetico e ritenzione del calore

Scala di prestazione	Punteggio

Riferimenti normativi e legislativi	Soluzioni progetuali di riferimento per l'adeguamento normativo prestazionale
UNI EN ISO 6946:2007 " Componenti ed elementi per l'edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo" UNI EN ISO 13786 " Prestazione termica dei componenti per l'edilizia - Caratteristiche tecniche dinamiche - Metodo di calcolo" Dlgs 311/06 - Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 recante: Disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192 recante attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia UNI TS 11300:2008 Prestazione energetica degli edifici.	Prevedere idonei accorgimenti isolanti per una corretta coibentazione dell'involucro. Mediante la sostituzione delle finestre costituite da vetro singolo con nuove a minor trasmittanza termica. Prevedere un sistema a "cappotto" garantisce molti vantaggi: - maggior comfort termico invernale ed estivo dovuto alla maggior inerzia termica delle pareti; - realizzazione dell'intervento in breve tempo, con limitato disagio per le persone che abitano l'edificio. L'isolamento è più efficace se il "cappotto" di materiale isolante è posto all'esterno delle pareti: queste infatti assorbono il calore prodotto all'interno, lo trattengono grazie all'isolamento e lo rilasciano lentamente nell'ambiente; soltanto se gli spazi sono abitati saltuariamente è più efficace un cappotto interno, perché le pareti, isolate, non assorbono il calore che viene assorbito direttamente dall'aria e percepito più rapidamente dalle persone.

Fig. n. 1 – Scheda tipo analitica dell'edificio

3. STRUTTURA DELLE LINEE GUIDA E METODOLOGIA DI ANALISI (RELATIVAMENTE ALL'ESISTENTE)

Al fine di realizzare le *linee guida* propositive è indispensabile eseguire la "diagnosi" di un edificio, ovvero l'individuazione delle eventuali anomalie dell'insieme edificio-impianto, attraverso il confronto delle caratteristiche rilevate o calcolate (sulle sue parti o componenti) con quelle facilmente ed economicamente ottenibili per il prodotto innovativo che andrà all'utente finale, con l'applicazione delle tecnologie oggi disponibili.

Le anomalie possono riguardare diversi aspetti e possono interessare la stabilità, il consumo energetico, le caratteristiche funzionali, il benessere, la qualità dell'aria (IAQ), la sicurezza o l'igiene ambientale.

Questo lavoro riguarda principalmente la "diagnosi energetica", senza trascurare però gli aspetti connessi con il benessere, la sicurezza e l'igiene ambientale.

La diagnosi energetica (effettuabile anche tramite software) ha lo scopo di far conoscere preventivamente al committente l'efficacia economica dell'intervento, lo stato dell'insieme edificio-impianto, gli eventuali elementi "malati" sui quali

intervenire, il conseguibile risparmio energetico rispetto alla situazione di partenza. Lo scopo è quello di fornire uno strumento per modificare o integrare i regolamenti edilizi esistenti attraverso una serie di elementi che portano ad una concreta sostenibilità del processo edilizio sia riguardo ai nuovi edifici, sia a quelli esistenti.

Le *linee guida* da noi proposte hanno come obiettivo quello di favorire la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio locale intervenendo sull'esistente e sulle nuove costruzioni.

Nostro successivo argomento di ricerca sarà lo sviluppo di una serie di regole volte a migliorare il comportamento energetico ed ambientale degli edifici al fine di sensibilizzare gli operatori del settore ai criteri dell'edilizia bio-ecologica individuando, oltre ai requisiti essenziali legati al risparmio energetico, anche quelli relativi alla tutela dell'ambiente, alla salute e al benessere degli abitanti.

Le *linee guida* si ispirano ai principi sanciti dal *"Protocollo ITACA per la valutazione della qualità energetica ed ambientale di un edificio"* [4].

I requisiti, descritti nelle singole schede esplicative, trattano dei seguenti aspetti:

1. **prestazioni dell'involucro** (orientamento dell'edificio, isolamento termico, inerzia termica, ventilazione naturale e meccanica, isolamento acustico, tetti verdi, materiali ecosostenibili, etc...)
2. **efficienza energetica degli impianti** (impianto di riscaldamento, impianto di climatizzazione estiva, sistemi di produzione calore al alto rendimento, sistemi a bassa temperatura, contabilizzazione energetica degli impianti, efficienza degli impianti elettrici, etc...)
3. **fonti energetiche rinnovabili** (impianti solari termici, impianti solari fotovoltaici, impianti a biomasse, sistemi solari passivi, etc...)
4. **sostenibilità ambientale** (riduzione del consumo di acqua potabile, recupero acque piovane, inquinamento elettromagnetico interno e da gas radon)

PRESTAZIONI DELL'INVOLUCRO
Isolamento acustico
Riferimenti normativi
Standard prestazionali
Prestazioni attese
Linee guida

Fig. n. 2 – Linea guida relativa all'Isolamento Acustico

4. CASO STUDIO (STRUTTURA ESISTENTE) ED APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI ANALISI

La tipologia dell'edificio considerato come caso studio è di tipo economica popolare (IACP) realizzato negli anni '70. Le soluzioni previste per l'edificio e le relative prestazioni energetiche sono state analizzate considerando i dati climatici della città di Messina [5].

L'edificio residenziale in oggetto ha dimensioni in pianta di ca 16,87m x 9,31m, si sviluppa su 4 piani fuori terra per 8 appartamenti, ha una superficie totale di 480 m^2 (vedi Fig.3-6).

Relativamente alla struttura in oggetto è stato eseguita:

- una simulazione di calcolo energetico al fine di determinare l'efficienza energetica dell'edificio *antecedentemente* e *successivamente* ai nostri interventi proposti, mediante il software di calcolo DOCET [6];
- una analisi termografica mediante termocamera FLIR Systems a infrarossi ThermaCAM™ E320 [7]. L'analisi ha permesso di verificare la continuità dell'isolamento termico e la presenza di ponti termici costituiti da travi, solai e pilastri (vedi Fig. 8);
- stesura della linea guida relativa all'Isolamento Acustico.



Fig. n. 3 – Contesto e inquadramento

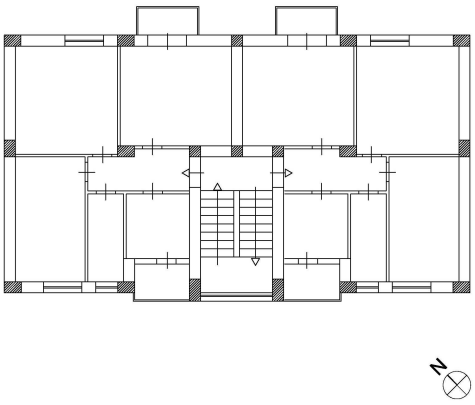


Fig. n. 4 – Pianta piano tipo del Caso Studio

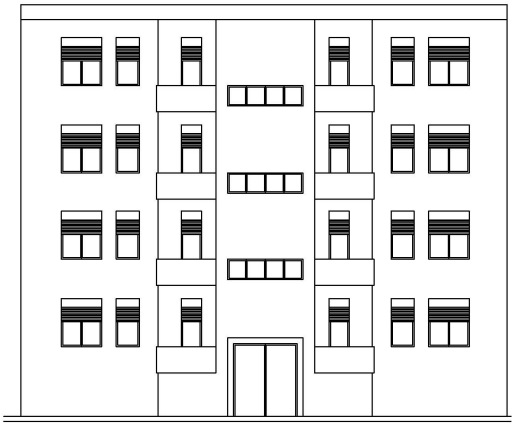


Fig. n. 5 – Prospetto SUD del Caso Studio



Fig. n. 6 – Prospetto NORD del Caso Studio

Scheda generale dell'immobile	
Ubicazione	Via A. di Anfuso - Messina
Tipologia dell'immobile	Residenziale
Anno di costruzione	1976
N° alloggi	8
Ristrutturazioni importanti	Alcuni appartamenti hanno sostituito gli infissi Alcuni appartamenti hanno installato un sistema di riscaldamento
Sistema di riscaldamento	Senza impianto

Fig. n. 7 – Scheda generale dell'immobile relativa al Caso Studio

Il patrimonio edilizio IACP (istituto autonomo case popolari), è costituito da fabbricati che, nella maggior parte dei casi, sono stati costruiti in un periodo in cui nessuna legge ne regolava il funzionamento energetico e, tanto meno, ne suggeriva il risparmio.

Il recente corpo normativo in riferimento al risparmio energetico negli edifici e alla loro certificazione impone dunque di riesaminare questi fabbricati, non solo alla luce dell'esigenza di salvaguardia dell'ambiente che li ospita, ma soprattutto per la rinnovata necessità di garantire all'occupante un ambiente ad elevate caratteristiche di comfort interno in riferimento alle caratteristiche dell'inquinamento indoor.



Fig. n. 8 – Analisi termografica mediante termocamera a infrarossi

PRESTAZIONI DELL'INVOLUCRO
Isolamento acustico
Riferimenti normativi • L. 447 del 26 ottobre 1995 " Legge quadro sull'inquinamento acustico" • D.P.C.M. 14-11-1997 "Valori limite delle sorgenti sonore" • DPCM 5 dicembre 1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici"
Prestazione attesa Requisiti acustici passivi degli edifici residenziali: • Rumore diffuso tra i locali db 50 • Rumore in facciata db 40 • Rumore da calpestio db 63 **Riferimento normativo:** Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 5 Dicembre 1997, tab. B, Classificazione degli ambienti abitativi categoria: A
Standard Prestazionale Ridurre al minimo la trasmissione negli ambienti interni del rumore trasmesso dall' esterno.
Linee guida Si ha la possibilità di adottare soluzioni differenti in base ai diversi elementi(pareti esterne, interne, aperture, pavimenti, coperture) e al tipo di intervento edilizio (nuova costruzione4 o recupero). I requisiti acustici devono essere soddisfatti in riferimento a: • uso dei materiali isolanti capace di diminuire l'energia sonora che li attraversa • pareti esterne (pareti semplici, con isolante, con controparete) • partizioni interne al fine di ridurre: - il passaggio di rumori esterni dovuti a trasmissione laterale; - la trasmissione di rumori interni dovuti principalmente a rumorosità di impianti, calpestio, rumori del vicinato. Aperture: per aumentare la capacita degli infissi di isolare acusticamente non è sufficiente aumentare la massa del vetro, ma si dovranno adottare soluzioni con doppio vetro che garantiscono anche l'isolamento termico. Per questo la scelta del vetro va effettuata insieme a quella del serramento sul quale verrà assemblato in modo da raggiungere la migliore prestazione dell'infisso.

Fig. n. 9 – Linea guida relativa all'Isolamento Acustico del Caso Studio

5. DISCUSSIONE E METODO

Le linee guida proposte sono state attuate mediante l'utilizzazione del software in dotazione (metodo di calcolo DOCET). Nella fig. 11 sono riportati i dati di input relativi alla struttura in esame. Di seguito sono riportati gli indicatori di prestazione energetica antecedenti e successivi all'intervento di adeguamento proposto. Ne consegue un miglioramento della classe energetica dell'edificio che passa da una classe **G** a una classe **C**. Il consumo energetico annuo inizialmente pari a 71,2kWh/m^2 si riduce a 30,9kWh/m^2. (fig.11-14).

Edificio			
Tipologia edilizia	Residenziale		
Tipologia costruttiva	Casa in linea		
Anno di costruzione	1976	Numero di appartamenti	8
Volume lordo riscaldato V(m³)	5836	Superficie utile m²	1564
Superficie disperdente S(m²)	992	Zona climatica/GG	B/707
Rapporto S/V	0,17	Destinazione d'uso	Residenziale

Fig. n. 10 – Parametri di input del Caso Studio col metodo di calcolo DOCET

Indicatori di prestazione energetica	
Prestazione energetica globale	71,2 K Wh/m² anno
Prestazione riscaldamento	45,7 K Wh/m² anno
Prestazione acqua calda sanitaria	25,5 K Wh/m² anno
Emissione di CO2	5,5 Kg CO2/m² anno

Fig. n. 11 – Valori degli indicatori prestazionali ottenuti con DOCET relativi allo Stato di Fatto del Caso Studio

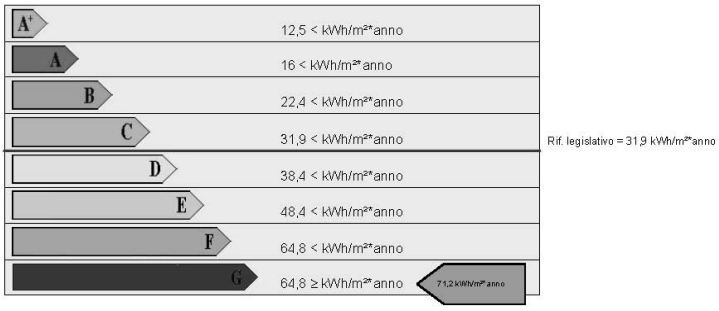


Fig. n. 12 – Classificazione energetica globale relativa allo Stato di Fatto del Caso Studio

Indicatori di prestazione energetica	
Prestazione energetica globale	30,9 K Wh/m² anno
Prestazione riscaldamento	21,3 K Wh/m² anno
Prestazione acqua calda sanitaria	9,6 K Wh/m² anno
Emissione di CO2	6,1 Kg CO2/m² anno

Fig. n. 13 – Valori degli indicatori prestazionali ottenuti con DOCET relativi alla Soluzione Progettuale del Caso Studio

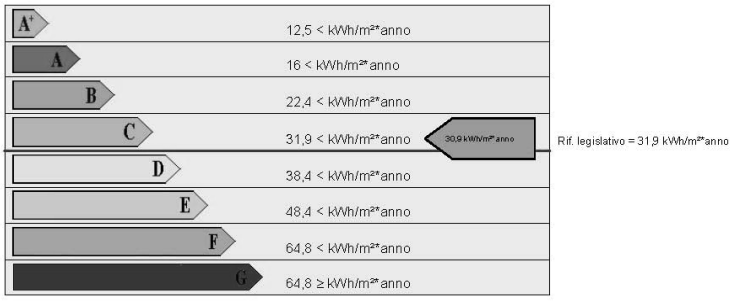


Fig. n. 14 – Classificazione energetica globale relativa alla Soluzione Progettuale del Caso Studio

CONCLUSIONI

Tale studio ha permesso di verificare come, attraverso determinate scelte progettuali (applicazione di un "cappotto" all'involucro dell'edificio, sostituzione dei componenti finestrati a vetro singolo con vetri bassi-emissivi a minor trasmittanza termica, etc.) indicate dalle *linee guida*, si riescano a rispettare i limiti caratterizzanti lo standard dettati dalla normativa. In particolar modo mediante l'applicazione ad un caso studio delle *linee guida* proposte, si è dimostrato come sia possibile ridurre il FEN migliorando le prestazioni energetiche dell'involucro edilizio. Le linee guida proposte sono state attuate mediante l'utilizzazione del software in dotazione (metodo di calcolo DOCET) ottenendo un risparmio energetico valutato nell'ordine di 40,3 kWh/m^2 annui.

La classe energetica dell'edificio si è notevolmente migliorata passando da una classe **G** a una classe **C.**

BIBLIOGRAFIA

1. Allegato I, D. Lgs. 192/2005.
2. Allegato C, D. Lgs. 192/2005.
3. UNI 8290-1 " Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia."
4. Protocollo ITACA : http://www.itaca.org.
5. DPR 412/93 Tabella Allegato A
6. DOCET, metodo di calcolo per la certificazione energetica degli edifici predisposto da CNR ed ENEA
7. http://www.flirthermography.com

INDICE DI EFFICIENZA ENERGETICA: VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI PER LA CERTIFICAZIONE DEGLI EDIFICI ATTRAVERSO ESPERIENZE APPLICATIVE

Angelo Milone [1], Daniele Milone [2], Salvatore Pitruzzella [3]

[1] Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali. Università di Palermo. amilone@dream.unipa.it
[2] Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali. Università di Palermo. daniele.milone@dream.unipa.it
[3] Dipartimento di Ingegneria Civile. Università di Messina. pitruzzella@architettura.unipa.it

SOMMARIO

La certificazione energetica esprime attraverso uno o più indicatori la qualità energetica di un edificio.

Uno degli obiettivi della procedura di certificazione energetica degli edifici è quello di pervenire a degli indicatori di prestazione energetica che consentano di comparare le prestazioni degli edifici in condizioni standard di funzionamento.

Questo articolo mostra i risultati di uno studio effettuato sul comportamento energetico di tre edifici residenziali, appartenenti all'architettura contemporanea e rappresentativi delle caratteristiche costruttive adottate in Italia dopo il 1960.

Tali edifici, collocati in tre diverse regioni e rappresentative della varietà climatica dell'Italia, sono stati confrontanti attraverso un software di simulazione, indagando sulle loro prestazioni energetiche e confrontando i tra di loro i rispettivi indice di efficienza energetica.

INTRODUZIONE

La Direttiva 2001/91/CE in materia di rendimento energetico degli edifici ha come obiettivo la realizzazione del potenziale risparmio energetico nei paesi della Comunità Europea, attraverso l'armonizzazione delle varie legislazioni locali e la riduzione del divario esistente tra i diversi Stati membri, pur nel rispetto delle differenti condizioni climatiche e locali, delle esigenze dell'ambiente termico interno agli edifici e del benessere degli occupanti, delle problematiche legate ai costi economici e alle ragioni della sicurezza e dell'uso cui sono destinati gli edifici [1].

La Direttiva, recepita dagli Stati membri il 4 gennaio del 2006, prevede di migliorare le performance energetiche degli edifici richiedendo:

- Un quadro generale di una metodologia comune per il calcolo integrato del rendimento energetico degli edifici;
- L'applicazione di prescrizioni minime in materia di rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione e di edifici esistenti di grande metratura sottoposti a ristrutturazione;
- La certificazione energetica degli edifici;
- L'ispezione e la valutazione specifica delle caldaie e degli impianti di riscaldamento e raffreddamento.

È stabilito l'obbligo per tutti i governi di applicare una metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici sviluppato attraverso un approccio integrato, che tenga conto, cioè, non solo del risparmio energetico derivante dall'isolamento termico e dall'efficienza degli impianti di riscaldamento, ma anche dei risparmi ottenibili ottimizzando i fattori che influenzano il consumo di energia per il raffrescamento estivo, per la ventilazione e per l'illuminazione [2-3].

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

Si prevedono due distinte modalità di valutazione sensibilmente diverse e con differenti implicazioni anche per la certificazione:

- Valutazione standard (*asset rating*), basata sul calcolo dell'energia che si prevede di consumare in condizioni standardizzate di utilizzo dell'edificio, ottenuta assemblando i dati in ingresso in diversi possibili modi (da disegni e valori di progetto per gli edifici nuovi, da disegni, rilievi sul posto e regole deduttive per gli edifici esistenti) e correggendo successivamente i dati attraverso l'utilizzo dell'energia contabilizzata; essa esprime, pertanto, le potenzialità intrinseche dell'edificio; sono previsti metodi di calcolo più o meno dettagliati [4];
- Valutazione in esercizio *(operational rating)*, basata sulla misurazione di tutte le quantità di energia effettivamente erogate (elettricità, gasolio, gas …) [5].

Il calcolo dei consumi energetici è funzione sia delle caratteristiche dell'edificio che degli impianti installati. Esso è strutturato in tre livelli che prevedono il calcolo dell'energia netta consumata per soddisfare tutte le necessità, il calcolo dell'energia fornita, il calcolo degli indicatori globali di prestazione energetica (energia primaria, emissione di CO_2, ecc.).

La sequenza di calcolo prevede:

a) Calcolo dell'energia netta utilizzata. In questa fase si esaminano solo le proprietà della costruzione escludendo le prestazioni del sistema impiantistico. Si considera, in altri termini, l'energia Q_h fornita (o estratta in regime estivo) dai terminali per mantenere una prefissata temperatura interna. Si devono fornire dati inerenti i requisiti del clima interno, gli apporti interni di calore, le proprietà della costruzione e le

condizioni climatiche.

b) Calcolo dell'energia fornita prendendo in esame le caratteristiche di tutti i sistemi impiantistici (riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, acqua calda sanitaria, ecc.) compreso la regolazione degli stessi.

c) Calcolo dell'energia totale primaria Q_p, ottenuta combinando i risultati della fase *b* per i differenti usi e tipi di combustibile, ed i relativi indicatori di prestazione (energia primaria normalizzata o corrispondente emissione di CO_2).

IL CALCOLO DELL'ENERGIA PRIMARIA

È utile soffermarsi sul concetto di energia primaria Q_p definibile come il potenziale energetico presentato dai vettori e fonti energetiche non rinnovabili nella loro forma naturale (quando non hanno ancora subito alcuna conversione o processo di trasformazione); considerando ad esempio due edifici con uguale fabbisogno energetico, quello riscaldato con gas ha un consumo d'energia primaria minore di quello che usa carbone per produrre energia elettrica da usare nel riscaldamento; di questo si tiene conto mediante un opportuno fattore di conversione che consente di conoscere l'energia totale primaria consumata da un edificio, senza che questa abbia subito trasformazioni, e quindi di effettuare un confronto tra edifici diversi, che usano combustibili diversi, su basi oggettive [6]. Il raffronto può poi essere esteso, oltre che sul piano puramente energetico, anche al potere inquinante del combustibile calcolando l'emissione di CO_2 corrispondente.

Ogni nazione/regione dovrà definire i fattori di conversione f_p per ogni tipo di combustibile al fine di consentire il calcolo delle prestazioni [7].

L'energia primaria, quindi, dipende, da un lato dal fabbisogno di energia e dall'altro, dal tipo di combustibile o vettore utilizzato per produrre energia e, infine, dall'efficienza di produzione [8]. Questo indicatore, secondo il progetto di norma europeo prEN 15315, è calcolato con la seguente equazione:

$$Q_p = \Sigma_i Qi \cdot f Q_p i \qquad (1)$$

dove:

- Qi è la sommatoria dei consumi di ogni vettore energetico (per riscaldamento, raffrescamento, illuminamento, acqua calda sanitaria, ventilazione ed energia elettrica) tenendo conto dei rispettivi rendimenti;
- Q_pi è il fattore di energia primaria dell'i-esimo vettore energetico.

L'energia primaria specifica EP è definita attraverso il rapporto:

$$EP = Q_p / \text{Area climatizzata (kWh/m}^2 \cdot \text{anno)} \qquad (2)$$

METODI PER ESPRIMERE LE PRESTAZIONI

La norma prEN 15217 "Energy performance of buildings – Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings" rappresenta la sintesi di tutta l'impostazione della direttiva ed i temi in essa contenuti nascono dalla necessità che le prestazioni energetiche siano espresse in forma affidabile e comprensibile per consentire sia la definizione dei requisiti minimi prestazionali degli edifici sia per consentire agli utenti di conoscere le prestazioni di progetto o di edifici esistenti [9].

Si definiscono:

- modi per esprimere i requisiti energetici per costruzioni nuove ed esistenti, o per ristrutturazioni ed ampliamenti;
- indicatori che esprimono le prestazioni energetiche globali dell'edificio;
- valori di riferimento che possono essere usati per confrontare le prestazioni dell'edificio in esame con quelle ottimali o di un tipico edificio espressione di valori medi (*benchmark*);
- schemi di certificazione energetica con possibili contenuti ed opzioni.

I requisiti energetici dell'edificio includono almeno uno degli indici prestazionali globali (EP, CO_2, costo dell'energia).

In generale il soddisfacimento del requisito è scritto nella forma:

$$EP \leq EPR \qquad (3)$$

dove EP è l'indice prestazionale e EPR è il valore limite di riferimento del requisito stabilito per legge.

La tipologia dell'edificio è caratterizzata del fattore di forma:

$$f = \frac{A_E}{A_C} \qquad (4)$$

dove A_E, in m^2, rappresenta l'area termica di involucro che racchiude il volume climatizzato di superficie "utile" A_C, intesa come area del pavimento degli spazi riscaldati o raffrescati, esclusi i locali non abitabili, compresa l'area del pavimento di tutti i piani se più di uno [10].

I valori di riferimento con i quali confrontare le prestazioni energetiche di un dato edificio, dovranno essere distinti per categorie di destinazione (case monofamiliari, blocchi di appartamenti, uffici, scuole, ospedali, ecc.) e in base al clima; essi saranno definiti, inoltre, a livello nazionale o regionale.

Tuttavia la norma europea suggerisce l'utilizzo di tre riferimenti:

- RR, valido per la valutazione standard, può corrispondere approssimativamente al valore che ci si attende per le nuove costruzioni; deve essere definito nei nuovi regolamenti a partire dal 2006, anno di recepimento della Direttiva;
- RS, valido per la valutazione funzionale, corrisponde ai consumi del patrimonio edilizio esistente, cioè quel valore «che ci si attende potrà essere raggiunto approssimativamente dal 50% del patrimonio edilizio nazionale o regionale nel 2006» [11]
- R0, corrispondente ad assenza di consumi o emissioni, ovvero ad una costruzione che produce tanta energia quanto ne consuma.

Le prestazioni energetiche di un edificio saranno classificate secondo una scala di valori del parametro esprimente la prestazione, graduata da A (miglior valore) a G (peggiore).

Nella scala il valore del benchmark RR è posto a confine tra la classe B e C mentre il valore RS tra la classe D ed E.

In pratica dopo aver determinato l'indice EP e i valori R_S e R_R relativi al tipo di edificio si calcolano i rapporti EP/R_R e EP/R_S [12]. Si determina il valore dell'indice di classificazione C secondo la modalità fissata dalla prEN15217:

- $EP/RR \leq 1$, $C = EP/RR$
- $EP/RR \geq 1$, $C = 1 + EP/RR$

negli altri casi si pone $C = 1 + [(EP - RR)/(RS - RR)]$.

LA SIMULAZIONE DELLE PRESTAZIONI

Oggetto della simulazione sono stati tre edifici multipiano, ad uso residenziale, progettati da tre architetti italiani tra gli anni Cinquanta e Sessanta in tre diverse città. In particolare:

- l'abitazione Borsalino ad Alessandria;
- l'edificio a torre INA-Assicurazioni a Roma;
- il palazzo Dara a Palermo.

La scelta è stata quella di incentrare l'analisi su tre edifici molto simili per caratteristiche morfologiche e costruttive e che sintetizzano le maggiori differenze climatiche e meteorologiche che si hanno nel territorio nazionale.

Lo scopo è quello di effettuare un confronto utile per lo studio del comportamento passivo dei tre edifici.

Dopo una approfondita ricerca per individuare le caratteristiche geometriche, attraverso il disegno e le proprietà dei materiali da costruzione, consultando la vasta bibliografia presente, per ogni edificio si è avviata la simulazione variando di volta in volta i dati climatici.

Ad esempio, si sono ottenuti risultati di prestazioni energetica dell'abitazione Borsalino ad Alessandria e successivamente due nuove serie di dati variando il contesto climatico come se l'edificio fosse costruito a Roma e a Palermo. Lo stesso è stato fatto per gli altri due edifici.

Le tre città scelte presentano dati climatici molto diversi [13].

Il comune di Alessandria (95 m. sul livello del mare) con i suoi 2 559 Gradi Giorno appartiene alla zona climatica E.

Per quanto riguarda l'accensione degli impianti il limite massimo consentito è di 14 ore giornaliere nel periodo che va dal 15 ottobre al 15 aprile con 183 giorni di riscaldamento.

La temperatura e l'umidità relativa esterna di calcolo, come previsti dalla legge, sono rispettivamente di -8 °C e 44.4%.

Il comune di Roma (20 m. sul livello del mare) rientra nella zona climatica D con 1 415 Gradi Giorno; l'accensione degli impianti è consentita, con un limite di 12 ore di funzionamento giornaliero, nei 166 giorni di riscaldamento, dall'1 novembre al 15 aprile. La temperatura esterna per il calcolo è di 0 °C mentre l'umidità relativa è del 38.8%.

Infine Palermo (14 m. sul livello del mare) che con 751 Gradi Giorno appartiene alla zona climatica B. È stabilito un periodo di funzionamento degli impianti di 121 giorni, dall'1 dicembre al 31 marzo, per un limite massimo di 12 ore giornaliere. La temperatura esterna di progetto è di 5 °C e l'umidità relativa del 59.8%.

Molto diversi nei tre contesti climatici sono anche i valori di radiazione media solare globale, di cui si deve tenere conto nella simulazione, soprattutto in fase di stima degli apporti gratuiti e di soleggiamento delle superfici finestrate [14].

Un'ultima distinzione va fatta anche per la ventosità nelle tre aree.

Per la città di Alessandria è fissato un valore di progetto di velocità del vento pari a 1.2 km/h, per Roma 2.6 km/h e per Palermo 3.6 k/h.

I valori delle temperature medie mensili delle tre città sono riportati nella figura 1 che segue.

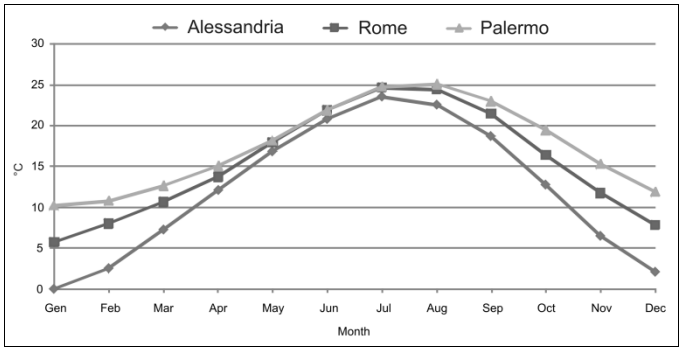


Figura 1. Andamento delle temperature medie mensili

Edificio "Casa Borsalino" ad Alessandria

L'edificio si compone complessivamente di 32 unità abitative, distribuite in quattro appartamenti per ognuno degli otto piani. Ciascun appartamento ha una superficie di circa 90 m^2; La struttura è in cemento armato, completamente compresa nel paramento di chiusura in muratura di mattoni, con rivestimento esterno in piastrelle klinker di color marrone bruciato. I solai sono in laterizio e la copertura in cemento armato impermeabilizzato

I serramenti sono in legno "Douglas Fire", con vetro semplice.

Nelle figura 2 che segue, sono riportate la pianta del piano tipo ed una immagine dell'edificio studiato.



Figura 2. Pianta tipo ed immagine esterna di "Casa Borsalino" ad Alessandria.

Ai fini del calcolo, dopo il ridisegno e l'attribuzione dei materiali ai diversi elementi della struttura, opachi verticali e orizzontali, e vetrati, si è proceduto all'assegnazione delle zone termiche.

Posto l'obiettivo di ottenere risultati sul comportamento passivo dell'involucro edilizio è parso opportuno procedere distinguendo quattro zone termiche: una zona termica riscaldata per tutti i locali interni degli appartamenti alla temperatura interna di progetto di 20 °C; una zona termica non riscaldata relativa ai locali del corpo scala-ascensore alla temperatura di 13,5 °C; due diverse zone termiche per i piani seminterrato e sottotetto rispettivamente alle temperature di 0°C e -7 °C.

Questi ultimi due valori sono subito apparsi esagerati, ma va considerato che la temperatura esterna di progetto per la città di Alessandria è di -8 °C e, soprattutto, l'ultimo piano scambia con l'esterno con tutte le sue pareti, ad eccezione del solaio di calpestio; tanto più che la copertura piana non è particolarmente isolata e quindi tali condizioni giustificano i valori ottenuti [15]. Per quanto riguarda il sistema di riscaldamento, è stato considerato un generatore a combustione con termovettore acqua e potenza utile nominale di 18 kW. Sono stati definiti i rendimenti di regolazione ipotizzando un uguale comportamento per l'utenza. Lo stesso tipo di generatore è stato utilizzato anche per simulare le prestazione energetiche degli altri due edifici. Questo perché, anche se in condizioni climatiche esterne molto diverse, difficilmente le potenze dei generatori vengono ormai scelte in funzione delle temperature e i prodotti presenti sul mercato e commercializzati sono circa gli stessi [16].

Per Alessandria sono previste, come già detto, 14 ore di funzionamento giornaliero degli impianti. Si è rispettato tale limite impostando un regime intermittente con 4 ore di spegnimento o attenuazione, tra le 8.00 del mattino e le 16.00, e 8 ore, tra le 16.00 e le 8.00. Si è deciso di non considerare la produzione del generatore per l'acqua calda sanitaria, che è calcolata dal software in funzione della destinazione d'uso, nel nostro caso abitazione, del numero dei bagni presenti e del tipo di gestione, se autonoma o centralizzata. Nel confronto tra i tre edifici ci è sembrato che questo fattore potesse essere un dato non coerente per la determinazione delle prestazioni passive dell'involucro. Per i ponti termici sono stati adottati valori di coefficienti lineici k_l riferiti ad abachi per ogni tipologia; in particolare si sono considerati ponti termici per le coperture, angoli, balconi, serramenti di porte e finestre [17-18].

4.2 Edificio a torre INA a Roma

L'edificio, a pianta rettangolare ha quattro appartamenti per ognuno dei nove piani. Libero su tutti e quattro i lati è orientato secondo l'asse eliotermico esponendo a nord la testata corta dell'edificio. Ogni appartamento ha una superficie di circa 55 m^2. I quattro appartamenti sono quasi perfettamente speculari rispetto ai due assi longitudinale e trasversale. La struttura è in cemento armato interamente lasciato a vista. Gli elementi di chiusura sono costituiti da pannellature di mattoni semipieni in laterizio dello spessore variabile di 30, 40 e 55 cm con intonaco. Per questi ultimi due, fra le file di mattoni, è posta una intercapedine d'aria.

I solai intermedi e di copertura sono in struttura tradizionale latero-cementizia. Il settore verticale, che ospita l'infisso in legno all'interno di ogni pannellatura, è trattato in diverso modo con sottofinestra con rivestimento esterno in maiolica smaltata. L'oscuramento è a mezzo di tapparelle avvolgibili e per gli infissi è utilizzato vetro semplice.

Nella figura 4 che segue sono riportate la pianta del piano tipo ed una immagine dell'edificio studiato.

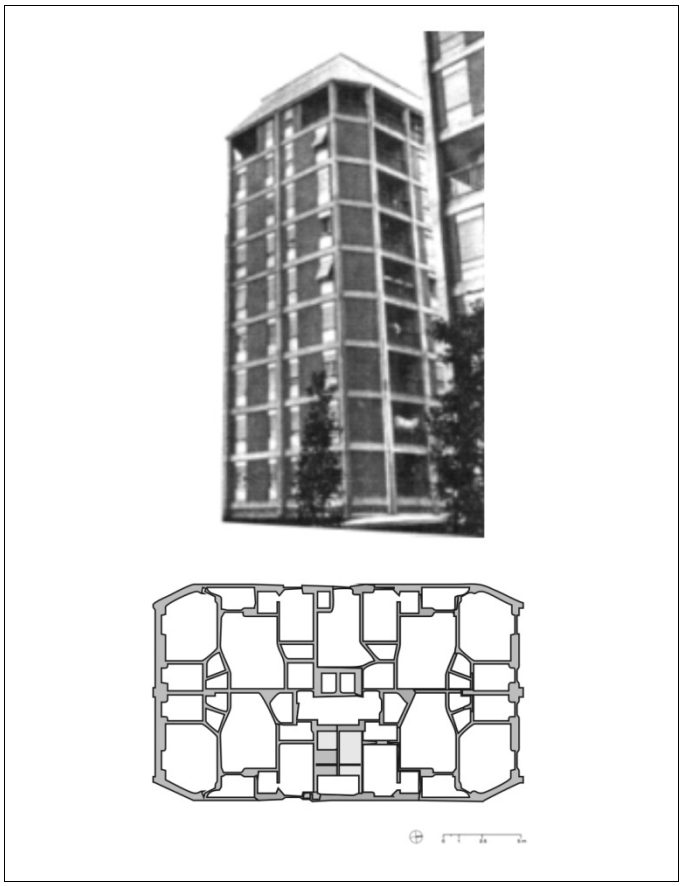


Figura 4. Pianta tipo ed immagine esterna dell'edificio a torre INA a Roma.

Per la simulazione delle prestazioni sono state assegnate quattro diverse zone termiche: la zona termica riscaldata per tutti i locali interni degli appartamenti alla temperatura di progetto di 20 °C; una zona termica non riscaldata relativa ai locali del corpo scala-ascensore alla temperatura di 17,5 °C; la zone termica relativa al piano seminterrato con temperatura interna di 0 °C quella sottotetto 2.5 °C. L'ultimo piano dell'abitazione non è interamente confinante con il locale sottotetto poiché si tratta di una alta mansarda che non occupa l'intera superficie lasciando delle parti scoperte. Per questo parte degli appartamenti del piano loggiato scambiano direttamente con l'esterno.

È stato anche qui considerato un generatore a combustione con termovettore acqua e potenza utile nominale di 18 kW.

Per Roma sono previste 14 ore di funzionamento giornaliero degli impianti. Si è rispettato tale limite impostando un regime intermittente con 4 ore di spegnimento o attenuazione tra le 8.00 del mattino e le 16.00, e 6 ore tra le 16.00 e le 8.00.

Non è stata considerata ai fini del calcolo, l'energia necessaria alla produzione per l'acqua calda sanitaria e per i ponti termici sono stati adottati valori di coefficienti lineici kl riferiti ad abachi per le coperture, angoli, balconi, serramenti di porte e finestre come già per l'abitazione Borsalino. Oltre a questi, si sono valutati gli opportuni ponti termici per tenere conto della maglia strutturale dell'edificio che è interamente a vista e che interrompe il paramento murario generando una serie di discontinuità geometriche e di materiali. Purtroppo il

software utilizzato pone molti limiti ai fini di un calcolo preciso anche se l'immissione manuale dei valore di kl ha permesso di inserirli comunque.

Palazzo Dara a Palermo

L'edificio, è composto da tre piani destinati ad uffici (esclusi dal calcolo dell'efficienza energetica ai fini del confronto) e di altri cinque piani con due appartamenti per livello distribuiti quasi specularmente attorno ad un nucleo centrale. Esso è a pianta rettangolare, ed ha il prospetto principale orientato verso nord-est.

Oltre il quinto piano di abitazioni, arretrato rispetto al filo della facciata troviamo un piano attico con ampio terrazzo che corre sui tre lati e copertura piana. Il palazzo presenta una struttura portante in cemento armato con tompagni in blocchi di calcarenite di diverso spessore. Anche i tramezzi interni sono della stesso materiale. Solai e coperture sono in struttura latero-cementizia.

Gli infissi, sono diversamente composti nei diversi prospetti dell'edificio alternandosi per numero di ante e composti per accostamenti di finestre e porte finestre, ad ante fisse o apribili e di diverse dimensioni. Sono tutti con telaio in legno con vetro semplice e racchiusi da montanti metallici in lamierino. Il cassonetto è interno, con veletta in calcestruzzo intonacata e non visibile all'esterno. L'oscuramento è a mezzo di avvolgibili.

Nella figura 5 che segue sono riportate la pianta del piano tipo ed una immagine dell'edificio studiato.

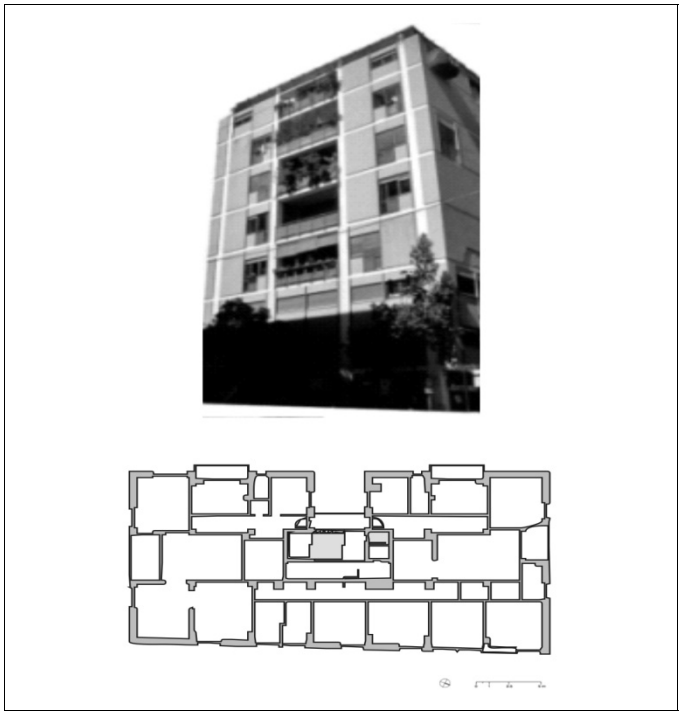


Figura 5. Pianta tipo ed immagine esterna di Palazzo Dara a Palermo.

RISULTATI

Completata l'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici si è passati ad un confronto dei risultati ottenuti e all'attribuzione, ad ognuno di essi, della classe energetica secondo la classificazione da A a G, facendo riferimento ai range di valori adottati per il metodo di certificazione SACERT [19].

La tabella 2 che segue riporta una sintesi dei risultati ottenuti, mentre in figura 6 è mostrata l'assegnazione delle classi.

Tabella 2. Riepilogo dei valori prestazionali dei tre edifici

	SUPERFICIE DISPERDENTE [m^2]	VOLUME Riscaldato [m^3]	RAPPORTO S/V	EP_i [kWh/m^2a]	FEN [kJ/m^3GG]	Cd [$W/m^3°C$]
Casa Borsalino	4 945	11 123	0.44	210	75	0.83
Edificio a torre INA	3 683	8 063	0.45	131	82	0.82
Palazzo Dara	3 894	11 254	0.34	45	56	0.56

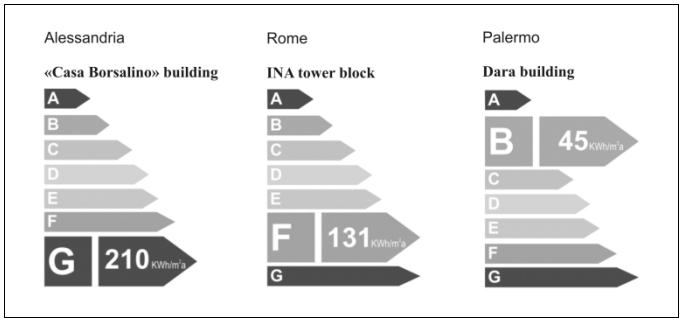


Figura 6. Classi energetiche di consumo per i tre edifici

Stando ai risultati ottenuti l'abitazione Borsalino ad Alessandria ottiene una classe di prestazione energetica G, l'edificio a torre INA a Roma una classe di prestazione energetica F e il Palazzo Dara una classe di prestazione energetica B.

Si è subito osservato che è abbastanza immediato che l'edificio di una zona climatica con temperature più rigide debba necessariamente richiedere un fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento superiore ad uno posto in un clima più mite.

Ricordiamo che, nel caso in esame, la temperatura esterna di progetto per la città di Alessandria è di -8 °C mentre per Palermo è di 5 °C, con una differenza di ben 13 °C.

Ci si è quindi chiesto che valore possa avere una classificazione energetica attribuita a prescindere dalle condizioni climatiche e se non sia necessario, prima di tutto, valutare la prestazione passiva dell'edificio per essere realmente confrontabile con altre.

Si tratterebbe in pratica di procedere ad un'astrazione dalle condizioni climatiche esterne al fine di ottenere un indice della vera e propria qualità prestazionale dell'edificio.

Questa procedura è stata elaborata attraverso la simulazione del comportamento dei tre edifici collocandoli nelle diverse città prese in esame, scambiando quindi i dati climatici ed analizzando i valori di prestazione per la Casa Borsalino ad Alessandria, Roma e Palermo e procedendo allo stesso modo per l'edificio a torre INA ed il Palazzo Dara.

I risultati di questa simulazione, espressi in fabbisogno di energia primaria mensile in MJ, sono riportati nelle figure 7-9 che seguono.

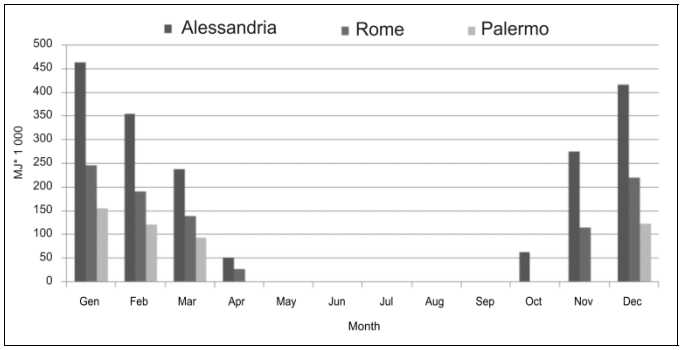


Figura 7. Abitazione Borsalino. Fabbisogno di Energia Primaria mensile [MJ] ad Alessandria, Roma e Palermo.

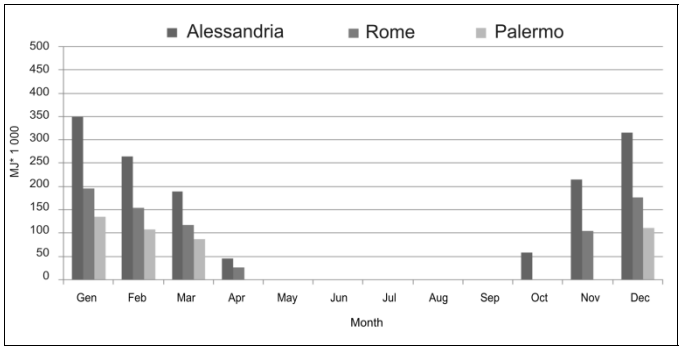


Figura 8. Edificio a torre INA. Fabbisogno di Energia Primaria mensile [MJ] ad Alessandria, Roma e Palermo.

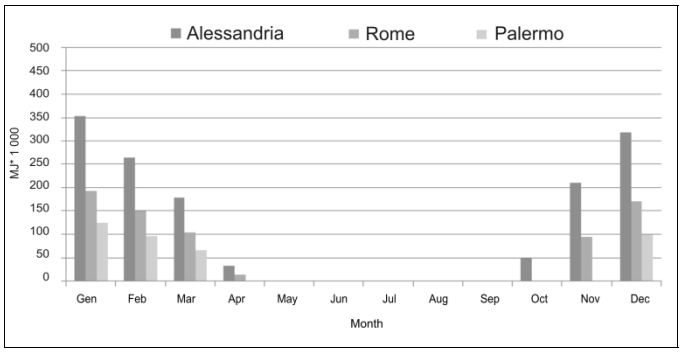


Figura 9. Palazzo Dara. Fabbisogno di Energia Primaria mensile [MJ] ad Alessandria, Roma e Palermo.

Per ogni città sono stati raggruppati i valori dei fabbisogni mensili di energia primaria in regime effettivo stagionale, calcolati in MJ, dei tre edifici ed i dati confermano gli elevati consumi dell'abitazione Borsalino.

Questo perché essi sono riferiti all'intero edificio che è di un volume superiore rispetto agli altri.

I valori per il palazzo Dara sono generalmente più bassi, ma molto prossimi a quelli dell'edificio INA soprattutto quando sono calcolati ad Alessandria. Questi risultati sono mostrati nelle figure 10-12.

Passando invece al calcolo dell'indice di prestazione energetica EPi riferiti al m^2 di superficie, si sono ottenuti i risultati riportati nella tabella 3.

Come si può notare lo stesso edificio modifica la propria classe energetica a seconda della città dove viene effettuata la simulazione. La casa Borsalino che aveva ottenuto la classe peggiore passa da G ad E se calcolata a Roma e addirittura a C se calcolata a Palermo.

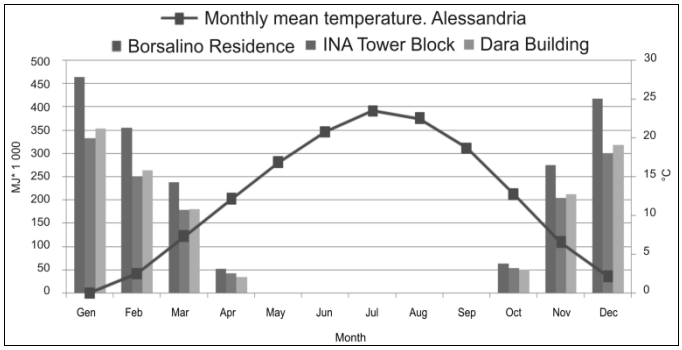


Figura 10. Dati climatici di Alessandria. Fabbisogno di Energia Primaria mensile [MJ] dei tre edifici.

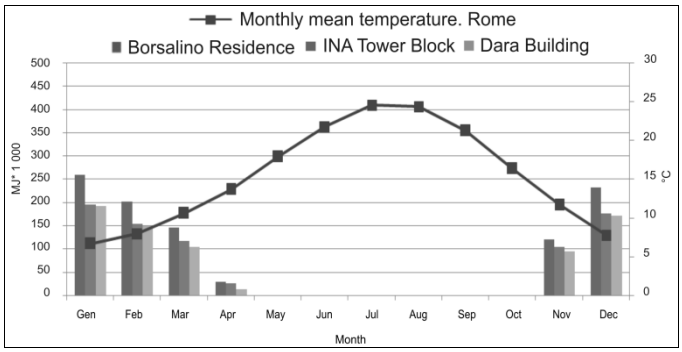


Figura 11. Dati climatici di Roma. Fabbisogno di Energia Primaria mensile [MJ] dei tre edifici.

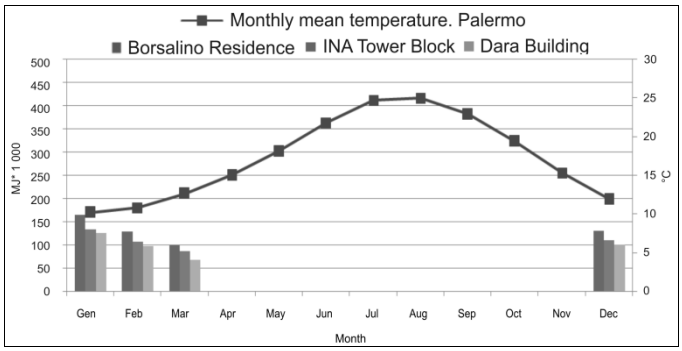


Figura12. Dati climatici di Palermo. Fabbisogno di Energia Primaria mensile [MJ] dei tre edifici.

Tabella 3. Valori degli indici di prestazione energetica EP_i e classi energetiche dei tre edifici nelle diverse città

	ALESSANDRIA		ROMA		PALERMO	
	EP_i [kWh/m^{2}K]	CLASSE	EP_i [kWh/m^{2}K]	CLASSE	EP_i [kWh/m^{2}K]	CLASSE
Casa Borsalino	210	**G**	114	**E**	60	**C**
Edificio a torre INA	225	**G**	131	**F**	74	**D**
Palazzo Dara	152	**F**	83	**D**	45	**B**

L'edificio a torre INA invece, tra i tre, appare il meno efficiente ottenendo ad Alessandria, Roma e Palermo rispettivamente le classi G, F e D. Il palazzo Dara si conferma

sicuramente con le migliori prestazioni ma, come si può notare, passa dalla classe B a Palermo alla classe F ad Alessandria.

Per quanto riguarda specificamente la forma degli edifici, provando a dare una interpretazione sui dati ottenuti, le peggiori prestazioni dell'edificio INA a Roma derivano probabilmente dal più alto rapporto S/V e dal fatto che la trama strutturale è interamente a vista, influendo di molto sulla dispersione del calore.

Anche nel Palazzo Dara travi e pilastri non sono chiusi tra i paramento murario, ma il risultato finale è equilibrato da un rapporto S/V molto più basso. Inoltre i tompagni sono in conci di calcarenite che, rispetto ai mattoni semipieni utilizzati a Roma, hanno un valore di trasmittanza più basso.

L'abitazione Borsalino, con un alto rapporto S/V e la maggiore superficie che scambia con l'esterno, fornisce una buona prestazione soprattutto a Palermo, quindi in presenza di temperature esterne di progetto più alte.

I dati ottenuti avvalorano e confermano le perplessità sopra espresse. Dal confronto effettuato siamo in grado adesso di stabilire che l'edificio a torre INA è, dal punto di vista energetico, il meno efficiente mentre il Palazzo Dara fornisce le migliori prestazioni. Ma resta ancora da chiedersi quale sia la misura della qualità dell'edificio e se sia possibile esprime un indice di tale qualità [19-20].

CONCLUSIONI

Lo studio condotto sul tema della certificazione energetica, con i metodi di applicazione attualmente adottati, e i risultati ottenuti nella parte sperimentale di analisi dimostrano quanto siamo ancora lontani da una pratica di certificazione ben determinata che sia in grado di fornire indicazioni precise e reali sull'efficienza degli edifici. Abbiamo visto quanto labile e incerta possa essere una distinzione in classi energetiche come quella attualmente utilizzata.

In fase di calcolo, inoltre, sono stati considerati esclusivamente i fabbisogni di energia per la climatizzazione invernale, non considerando quelli in regime estivo.

Tornando ai risultati dell'applicazione condotta in questo studio, i consumi di Palazzo Dara a Palermo, che si dimostrano i più bassi nella stagione invernale, con buona probabilità, non sarebbero confermati se valutati anche in relazione alla stagione estiva.

Un'annotazione va fatta anche per metodo adottato nell'affrontare l'analisi. I risultati ottenuti sono certamente validi, ma con un margine di errore generato dall'intervento personale nella procedura di calcolo e nelle scelte di impostazione e di semplificazione della stessa. Inoltre abbiamo già rilevato il grado di affidabilità dei software di analisi e le variazioni di risultati che essi presentano [21].

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Directive 2002/91/CE of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings, 2002.
2. Pitruzzella S., Milone D., Certificazione energetica degli edifici, In Ambiente Risorse Salute 103, Italy 2005.
3. X. Garcìa Casals, Analysis of building energy regulation and certification in Europe. Their role, limitation and differences, Energy and Buildings 38 (5) 2006.
4. Roulet C-A, Andersons B., CEN Standards for Implementing the European Directive on Energy Performance of Buildings. Proceedings of PLEA2006 – The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, September 2006.
5. CEN prEN 15203, 2005. Energy performance of buildings - assessment of energy use and definition of energy ratings.
6. Kydes A., Cutler J., Primary energy. In: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). Cleveland, 2007.
7. DM 24 aprile 2001, Individuazione degli obiettivi quantitativi per l'incremento dell'efficienza energetica negli usi finali ai sensi dell'art. 9, comma 1, del decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79.
8. prEN15315 Energy performance of buildings – Overall energy use, primary energy and CO2 emissions.
9. European Committee for Standardization, Energy performance of buildings - prEN 15217:2005 Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings, Bruxelles, 2005.
10. Jokisalo J. and Kurnitski J. 2007, Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate, Energy and Buildings. 39 (2): 236-247.
11. Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 , Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.
12. PrEN15217 "Methods for expressing energy performance and energy certification of buildings". March 2005.
13. UNI 10349, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici, 1994, Italian Standard.
14. Petrarca S, Spinelli F, Cogliani E, Mancini M. Profilo climatico dell'Italia. Ente Nazionale Energie Alternative, ENEA, ERG-SIRE-DBT, 1999.
15. ISO (International Organization for Standardization), Thermal performance of buildings – calculation of energy use for space heating and cooling, ISO/FDIS 13790, Geneva. 2007.
16. V. Martinaitis, A. Rogoza, I. Bikmaniene, Criterion to evaluate the ''twofold benefit'' of the renovation of buildings and their elements, in: Energy and Buildings, Elsevier Science, Amsterdam, 2004, n. 36.
17. Sherman, M.H., R.C. Sonderegger, and J.W. Adams, The Determination of the Dynamic Performance of Walls, ASHRAE Transactions 88 (1): 689, 1982.
18. Thermal bridges in building construction-heat flows and surface temperatures, Part 1: general calculation methods, prEN10211-1, 1994.
19. Milone A., Milone D., Pitruzzella S., The energy certification of buildings through the dynamic simulation of variable consumption. Proceedings of World Renewable Energy Congress X and Exhibition 19–25 July 2008. Glasgow – Scotland.
20. S. Pitruzzella., Ph. D. Thesis. University of Messina.
21. Milone A., Milone D., Pitruzzella S.. Asset rating: disagreement between the results obtained from software for energy certification. In Proceedings of 11th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition Building Simulation 2009. University of Strathclyde (GBR). Glasgow.

SESSIONE

INQUINAMENTO ACUSTICO E DA VIBRAZIONI

LA VALUTAZIONE DELLA POPOLAZIONE ESPOSTA IN UN'AREA INDUSTRIALE

Francesco Asdrubali[1], Mirko Filipponi[1], Samuele Schiavoni[1], Orietta Baglioni[2], Laura Bennati[2]

[1] Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti, 67, 06125 Perugia,
[2] Arpa Umbria, Dipartimento provinciale di Terni

SOMMARIO

La percentuale di popolazione esposta al rumore è uno dei principali indicatori individuati dalla normativa europea (2002/49/CE) e nazionale (D.lgs 194/05) per la descrizione del livello di inquinamento acustico. Al fine di popolare questo indicatore, ancora scarsamente considerato, il Dipartimento di Ingegneria Industriale, in collaborazione con Arpa Umbria, ha avviato fin dal 2005 una ricerca finalizzata alla valutazione della popolazione esposta nel territorio umbro, con particolare riguardo all'impatto acustico delle infrastrutture di trasporto.

Il lavoro riporta la metodologia ed i risultati ottenuti nel corso di uno studio recentemente effettuato nei pressi del cosiddetto "Polo Chimico" di Terni. Si è condotta una campagna di misure fonometriche al fine di stimare le emissioni dei diversi edifici dell'area industriale; si sono quindi costruite delle mappe di rumore e si è stimata la popolazione esposta. Le procedure impiegate per il calcolo e l'esposizione dei risultati di popolazione esposta rispettano le indicazioni contenute nei diversi "Position Paper" dell'European Commission Working Group (WG-AEN), riportate anche da APAT e dal Centro Tematico Nazionale-Agenti Fisici (CTN_AGF).

INTRODUZIONE

A partire dal 2005, grazie alla collaborazione tra l'ARPA Umbria e la Sezione di Fisica Tecnica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Perugia, è stato sviluppato un progetto di ricerca sulle modalità di attuazione dei contenuti della Direttiva 2002/49/CE [1] - recepita in Italia con il D. Lgs. 194/05 [2] - inerente le modalità di calcolo dell'indicatore popolazione esposta al rumore.

La normativa dispone la trasmissione alla Commissione Europea, entro il 2012, dei dati relativi al numero dei residenti negli agglomerati urbani con un numero di residenti superiore al 100.000 soggetti a determinati livelli di L_{den} e L_n.

Al fine di migliorare la confrontabilità dei risultati ottenuti per diversi luoghi di interesse, la Direttiva fornisce degli standard procedurali, quali, a titolo esemplificativo, i modelli di propagazione sonora.

Lo strumento individuato per la determinazione dell'indicatore popolazione esposta è costituito dalla redazione di apposite mappature acustiche, inerenti il rumore emesso dal traffico veicolare, ferroviario, aeroportuale e dai siti di attività industriale, porti compresi.

Nella regione Umbria, nonostante i comuni di Perugia e Terni superino le 100.000 unità, la dislocazione della popolazione nel territorio è tale da non dar luogo alla caratteristica di continuità richiesta nella definizione di "agglomerato".

Pur non sussistendo pertanto alcun obbligo circa la necessità di trasmettere le informazioni riguardanti la determinazione dell'indicatore, ARPA Umbria e il Dipartimento di Ingegneria Industriale hanno portato a compimento studi riguardanti diverse aree di interesse [3, 4, 5]. L'esperienza maturata grazie ai diversi casi di studio ha consentito di pervenire a procedure di calcolo ottimizzate, tali da ottenere risultati realistici anche in ambienti complessi, caratterizzati da molteplici sorgenti quali infrastrutture stradali, ferroviarie e stabilimenti industriali

Al fine di testare ulteriormente le metodologie messe a punto, l'ARPA Umbria e il Dipartimento di Ingegneria Industriale hanno concordato di effettuare la valutazione della popolazione esposta nell'area circostante il cosiddetto "Polo Chimico" di Terni; si tratta di un caso di studio di particolare interesse in quanto è stato possibile determinare l'indicatore considerando, in un ambiente acusticamente complesso, le sole sorgenti industriali.

La metodologia impiegata ai fini della realizzazione dello studio ha previsto l'esecuzione di apposite misure fonometriche giornaliere al fine di valutare la potenza sonora delle diverse sorgenti industriali presenti.

DESCRIZIONE DELL'AREA

L'area industriale ternana denominata "Polo Chimico" si estende per circa 0,9 Km^2 ed è caratterizzata dalla presenza degli stabilimenti e delle aree di pertinenza del complesso industriale precedentemente di proprietà della Polymer, specializzata nella produzione di fibre plastiche. Attualmente all'interno del polo industriale sono presenti sei diverse aziende e un depuratore per le acque.

Questo complesso è delimitato da quattro infrastrutture stradali, di seguito elencate in funzione del livello di emissione sonora (vedi Figura 1):

- Via Narni a Sud;
- la Strada di Sabbione a Ovest;
- Via dell'Impresa a Est;
- la Strada di Santa Filomena a Nord

Le emissioni sonore delle prime tre, a causa degli elevati flussi di traffico, sovrastano il rumore generato dallo stabilimento industriale, specialmente nelle aree prospicienti la sede stradale; la quarta strada è invece caratterizzata da un flusso veicolare meno consistente.

Gli insediamenti abitativi maggiormente esposti sono il Villaggio Polymer e il Villaggio Campomaggio, rispettivamente a Sud-Ovest e Sud-Est, i quali ospitano complessivamente circa 1.000 residenti [6].

Il "Polo chimico" è delimitato da un muro in cemento di altezza di circa 3 metri che consente di ostacolare la propagazione sonora in direzione degli edifici ad uso residenziale concentrati a sud dello stabilimento.

L'area di pertinenza degli stabilimenti industriali ricade in classe VI della vigente zonizzazione acustica del Comune di Terni, attualmente in fase di aggiornamento (vedi Figura 2).



Figura 1: Inquadramento del territorio: in evidenza l'area del "Polo Chimico" e i punti delle misure fonometriche.

SETUP DI MISURA

Realizzazione del modello digitale del terreno

Il primo passo per l'esecuzione della simulazione acustica consiste nella realizzazione di un modello digitale del terreno (*Digital Ground Model* o DGM) sviluppato mediante l'utilizzo delle informazioni tridimensionali disponibili. Nel caso del presente studio, ARPA Umbria ha fornito materiale digitale, completo di curve di livello e di punti quotati, ma privo di informazioni inerenti alle effettive dimensioni degli edifici e delle altre strutture presenti nell'area.

Da questi dati è stato comunque possibile pervenire alla realizzazione di un DGM accurato, il cui scopo è fornire una rappresentazione realistica del terreno, e conseguentemente ottenere una simulazione della propagazione sonora maggiormente coerente alla situazione effettiva.

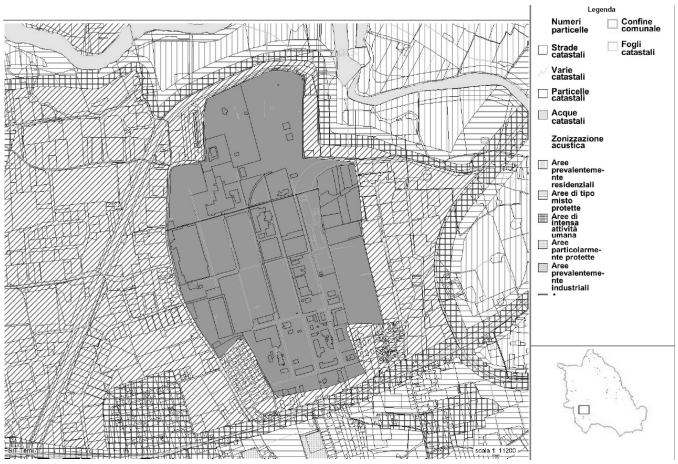


Figura 2: Zonizzazione vigente nell'area del "Polo Chimico"

In riferimento agli edifici, erano disponibili in formato digitale esclusivamente le coordinate tridimensionali dei solai di copertura. Mediante l'estrusione di questi elementi sul DGM è stato possibile approssimare la struttura reale di ogni tipologia di fabbricato (vedi Figura 3).



Figura 3: Creazione del modello digitale del terreno: dai dati digitali tridimensionali (sinistra) al DGM (a destra)

L'assenza di alcune sorgenti rilevanti nel materiale digitale disponibile, ha reso necessario l'aggiornamento dello stesso attraverso l'esecuzione di rilievi specifici e l'analisi di foto aeree aggiornate, realizzate nelle aree oggetto di studio.

Nell'eseguire tali operazioni sono state effettuate apposite procedure di georeferenziazione, in modo tale da poter considerare dati di diversa origine all'interno di un unico sistema tridimensionale di riferimento (vedi Figura 4).



Figura 4: Vista tridimensionale del DGM; in rosa sono rappresentate le sorgenti industriali

Individuazione delle sorgenti di rumore

Al fine di valutare la fattibilità di una simulazione acustica priva di informazioni riguardanti le caratteristiche di emissione delle sorgenti industriali, sono state effettuate misure fonometriche al di fuori del confine del "Polo Chimico": tale operazione ha reso necessaria l'individuazione delle altre fonti di rumore presenti nell'area in esame.

Tale approccio è giustificato in quanto i rilievi fonometrici forniscono una misura del rumore ambientale, proveniente da più sorgenti; per valutare l'effetto del solo impianto industriale si sono impostate le seguenti fasi del lavoro:

1. Individuazione delle sorgenti presenti nell'area circostante il "Polo Chimico";
2. Valutazione della emissione di tali sorgenti mediante appositi rilievi fonometrici;
3. Taratura del modello di propagazione sonora sulla totalità delle misure fonometriche eseguite, considerando l'emissione sia degli impianti industriali oggetto di studio sia delle altre sorgenti individuate nel punto 1;
4. Simulazione dell'emissione sonora dei soli impianti industriali presenti all'interno del "Polo Chimico";
5. Valutazione della popolazione esposta al solo rumore industriale.

Le sorgenti non industriali aventi un impatto sul clima acustico della zona sono rappresentate esclusivamente dalle quattro infrastrutture stradali precedentemente menzionate. Via Narni, la Strada di Sabbione e Via dell'Impresa, in particolare, hanno richiesto l'esecuzione di misure fonometriche *ad hoc*, in assenza dei dati relativi ai flussi di traffico.

Con riferimento alla Figura 1, i punti in cui sono stati eseguiti i rilievi acustici di taratura sono costituiti dai punti 1 (lungo Via Narni), 3 (Strada di Sabbione) e 4 (Via dell'Industria). La misura fonometrica eseguita nel punto 9 ha evidenziato lo scarso impatto dei volumi di traffico della Strada di Santa Filomena nel clima acustico dell'area, fenomeno particolarmente evidente nel periodo notturno.

Al fine di stimare le caratteristiche di emissività delle sorgenti industriali presenti all'interno dell'area in esame sono stati realizzati altri cinque rilievi fonometrici giornalieri nei pressi del confine del "Polo Chimico".

I risultati di tale campagna di misure sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1: Risultati delle misure fonometriche. Valori espressi in dB(A) comprensivi delle eventuali correzioni da componenti impulsive.

Punto	L_{day}	$L_{evening}$	L_{night}	L_{den}
1	62,8	59,7	55,8	64,2
2	58,6	52,5	56,5	62,9
3	68,0	63,3	59,2	68,5
4	63,6	62,4	58,8	66,4
5	54,3	54,2	55,0	61,1
6	65,6	53,9	53,2	64,6
7	62,9	55,9	55,1	63,7
8	68,7	63,7	60,8	69,5
9	63,6	53,8	53,1	63,2

Valutazione dell'emissione del rumore industriale

Il supporto tecnico del Dipartimento di Terni di ARPA Umbria ha consentito una prima individuazione e valutazione dell' emissività delle sorgenti di rumore presenti all'interno del "Polo Chimico". Tuttavia, al fine di avere a disposizione informazioni maggiormente complete ed esaustive, si sono eseguiti dei rilievi fonometrici nei punti 2, 5, 6, 7 e 8. Ovviamente da tali misure non è possibile scorporare direttamente il rumore di origine industriale da quello derivato da altre sorgenti impattanti, ed a tale scopo è stato necessario eseguire alcune operazioni preliminari.

In primo luogo si sono valutate le emissioni delle infrastrutture stradali utilizzando i rilievi fonometrici eseguiti nei punti 1, 3 e 4 (per i quali l'unica sorgente impattante era la strada ad essi contigua). A tale scopo si sono eseguite una serie di simulazioni preliminari, che hanno consentito la stima dei flussi di traffico presenti nelle infrastrutture stradali.

In secondo luogo si è effettuata la taratura delle emissioni degli impianti industriali, valutando separatamente ogni edificio definito come sorgente. Tale operazione è stata svolta attraverso ulteriori simulazioni preliminari, comprensive del rumore generato dalle infrastrutture stradali. Confrontando i risultati ottenuti con i valori di L_{den} e L_n misurati nei rilievi fonometrici, è stato portato a termine il processo di taratura delle sorgenti industriali (vedi Tabella 2).

Tabella 2: Confronto fra le misure fonometriche eseguite ed i risultati ottenute dalla simulazione di taratura del modello..

Punto	L_{den}		L_{night}	
	Misurato	Simulato	Misurato	Simulato
1	64,2	64,5	55,8	56,3
2	62,9	63,3	56,5	57,0
3	68,5	68,5	59,2	59,0
4	66,4	66,9	58,8	59,5
5	61,1	60,9	55,0	54,6
6	64,6	63,4	53,2	54,4
7	63,7	63,3	55,1	55,6
8	69,5	69,4	60,8	61,8
9	63,2	60,9	53,1	54,0

Al fine di ottenere una migliore completezza della simulazione si sono stimati anche gli effetti di un parcheggio di pertinenza del "Polo Chimico", per il quale è stato eseguito un rilievo del flusso di traffico e dei posti disponibili; come modello di emissione acustica si è utilizzato il "Parkplatziärmstudie 1994" [7].

Infine, allo scopo di procedere alla valutazione della popolazione esposta al solo rumore industriale, al termine delle precedenti operazioni di taratura, si è eseguita una nuova simulazione, dalla quale si sono esclusi i contributi delle sorgenti stradali (vedi Figure 5 e 6).

Dal confronto tra i risultati della simulazione acustica del rumore industriale espresso in L_{den} e L_n, con le informazioni inerenti la distribuzione dei residenti all'interno degli edifici ad uso abitativo, è possibile determinare il valore dell'indicatore popolazione esposta.

Estensione dell'analisi

Al fine della valutazione della popolazione esposta, si sono considerate tutte le sezioni di censimento aventi almeno un edificio ad uso abitativo la cui facciata maggiormente esposta è soggetta ad un livello acustico pari a 55 dB(A) in L_{den} o 45 dB(A) in L_n.

In questo modo sono stati inseriti nel procedimento di calcolo i dati relativi a 31 sezioni di censimento per un totale di 7.635 residenti [6].

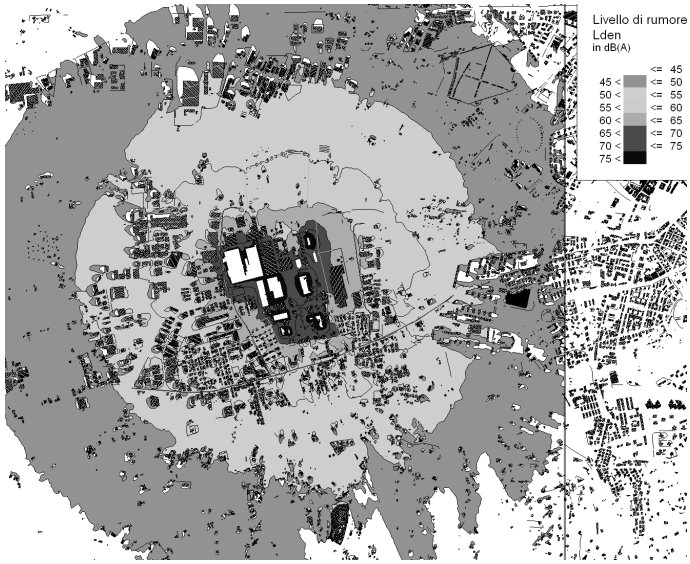


Figura 5: Risultato della simulazione acustica della propagazione del rumore emesso dalle sorgenti industriali (edifici non retinati) in L_{den}.

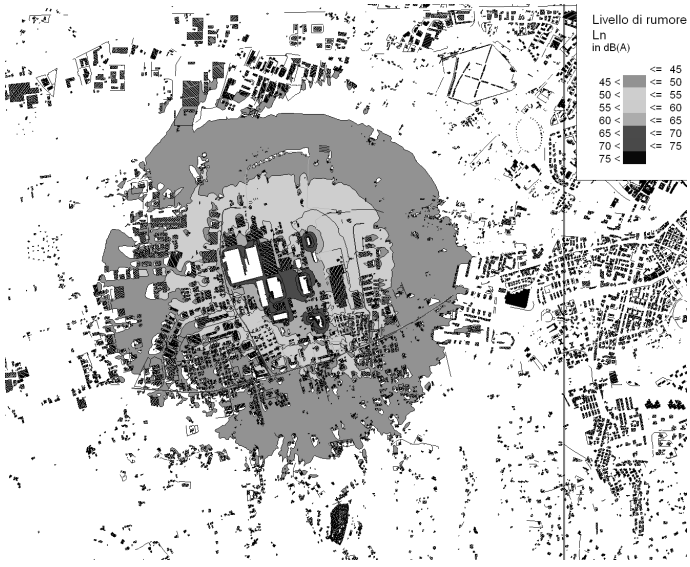


Figura 6: Risultato della simulazione acustica della propagazione del rumore emesso dalle sorgenti industriali (edifici non retinati) in L_n.

Distribuzione della popolazione

Per la distribuzione della popolazione negli edifici ad uso residenziale si è fatto riferimento ai dati del censimento nazionale ISTAT 2001 [6]. Tale documento riporta il numero di residenti rilevati in ogni sezione di censimento, rendendo possibile l'esecuzione della Procedura 12.1 individuata dal Centro Tematico Nazionale-Agenti Fisici (CTN_AGF) [8].

Tale metodo deve essere eseguito qualora siano disponibili i dati di popolazione residente nell'area soggetta a mappatura acustica, ma non si disponga della ripartizione all'interno degli edifici della stessa.

Per ripartire gli abitanti all'interno dei fabbricati ad uso abitativo sono state eseguite, per ogni sezione di censimento, le seguenti fasi:

a) Divisione del numero complessivo dei residenti presenti nella sezione in esame per la stima dell'area totale ad uso residenziale. L'indicatore che ne deriva è definito in abitanti/m^2 e rappresenta la densità abitativa. Sia *P* il numero complessivo dei residenti presenti nell'area di studio, *n* il numero complessivo di edifici in esame, *npi* il numero di piani dell'edificio residenziale *i*-esimo e *AR,i* la sua area in pianta. La densità abitativa *D* sarà pari a:

$$D = \frac{P}{\sum_{i=1}^{n} A_{R,i} * np_i} \quad (1)$$

b) Moltiplicazione, per ogni edificio residenziale presente nella sezione di censimento in esame, della sua superficie in pianta per il proprio numero di piani; in questo modo si esegue una stima dell'area ad uso abitativo disponibile per ogni edificio i-esimo (ART,i).

$$A_{RT,i} = A_{R,i} * np_i \quad (2)$$

c) Moltiplicazione, per ogni singolo edificio, della densità abitativa per l'area complessiva ad uso residenziale: in questo modo si ottiene per ogni singolo edifico la stima della popolazione presente Pi.

$$P_i = D * A_{RT,i} \quad (3)$$

Ripetendo tale procedura per ognuna delle sezioni di censimento prese in esame, è possibile determinare una realistica distribuzione della popolazione residente nell'area oggetto di studio.

VALUTAZIONE DELLA POPOLAZIONE ESPOSTA

La Direttiva individua le seguenti classi di esposizione per le quali deve essere determinato l'indicatore: 45-49, 50-54, 55-59, 60-64, 65-69, 70-74 e >75 (le prime 2 solo per il periodo *night*).

In via cautelativa, tutti i soggetti residenti all'interno di ogni singolo edificio sono stati assegnati alla classe corrispondente a quella della facciata maggiormente esposta al rumore originato dalla sorgente industriale (vedi Tabella 3).

L'analisi degli spettri delle misure fonometriche eseguite evidenzia come il rumore di natura stradale, in particolare nel periodo *day* e nei punti più distanti dal "Polo Chimico", sia preponderante rispetto a quello generato dalle sorgenti industriali.

La presenza all'interno del "Polo Chimico" di un gran numero di attività a ciclo continuo e la maggiore ristrettezza dei limiti nel periodo notturno, fanno sì che i valori più critici siano stati registrati per l'indicatore L_n.

I valori maggiori dell'indicatore di popolazione esposta si hanno nelle classi meno critiche a causa dell'elevata estensione dell'area analizzata (31 sezioni di censimento).

Analizzando le soglie 65 e 55 dB(A) rispettivamente per L_{den} e L_n, individuate dall'OMS come le più rischiose per la salute umana [9,10], si può notare come circa 450 residenti, su un totale di 5.191 esposti (8,7%), siano soggetti a valori di L_n superiori a tali limiti.

Tabella 3: Valori di popolazione esposta al rumore generato dal "Polo Chimico"

L_{DEN} (dB(A))	Residenti esposti	L_N (dB(A))	Residenti esposti
≤44	342	≤44	2.444
45-49	827	45-49	3.072
50-54	3.510	50-54	1.668
55-59	2.105	55-59	376
60-64	758	60-64	50
65-69	57	65-69	25
70-74	20	70-74	0
≥75	16	≥75	0
L_{DEN}≥65 dB(A)	93	L_N≥55 dB(A)	451
L_{DEN}≥55 dB(A)	2.956	L_N≥45 dB(A)	5.191

Allo scopo di effettuare una migliore caratterizzazione del territorio, si è eseguito un confronto dell'impatto della sorgente industriale rispetto a quello delle tre infrastrutture stradali maggiormente impattanti presenti nell'area (vedi Figure 7a e 7b).

a)



b)



Figura 7:Confronto fra le emissioni delle sorgenti industriali presenti all'interno del "Polo Chimico" e quelle delle principali infrastrutture stradali nei periodi *den* (a) e *night* (b).

Nell'area di studio si è eseguita una sottrazione algebrica fra il risultato della simulazione eseguita con le sole sorgenti industriali e quella con le sole infrastrutture stradale. Nella tonalità di verde sono rappresentate le zone nelle quali tale differenza è negativa, ovvero dove le emissioni sonore del flusso di traffico superano le rispettive del "Polo Chimico"; le aree dal nero al bianco evidenziano la condizione opposta.

L'analisi delle simulazioni eseguite evidenzia come le infrastrutture viarie costituiscano il maggior agente di impatto acustico nelle aree prospicienti ai margini delle carreggiate. In prossimità dello stabilimento industriale, ed a grande distanza dalle due tipologia di sorgenti, è superiore l'effetto delle emissioni del "Polo Chimico".

Tale fenomeno può essere spiegato se si considera la maggiore altezza delle sorgenti industriali, che pertanto risultano essere più difficilmente schermabili a grandi distanze.

CONCLUSIONI

La mappatura acustica eseguita ha consentito di valutare l'indicatore popolazione esposta per il rumore originato dal "Polo Chimico" di Terni nel rispetto dei dettami del D.Lgs. 194/05. L'area prospiciente a tale sorgente industriale, è risultata essere esposta anche alle emissioni di infrastrutture stradali, in particolar modo di Via Narni, che in alcune zone costituiscono la principale fonte di disturbo.

L'esecuzione di un'analisi comparativa fra rumore industriale ed infrastrutturale ne ha evidenziato le diverse caratteristiche di propagazione all'interno dell'ambiente urbano. L'altezza delle sorgenti presenti all'interno del "Polo Chimico" fa si che il suo impatto sia superiore in una porzione più ampia del territorio rispetto alle sorgenti stradali analizzate. Tuttavia, in prossimità dei margini delle carreggiate, risulta preponderante il rumore emesso dalle infrastrutture viarie. L'estensione delle aree in cui si concretizza tale fenomeno è superiore nel periodo *den* rispetto al periodo *night* a causa della riduzione dei flussi di traffico nel periodo notturno, ed è maggiore nei punti più distanti dalla sorgente industriale.

Lo studio della propagazione acustica è stato eseguito utilizzando esclusivamente rilievi fonometrici. A partire da essi è stata portata a termine una fase di taratura finalizzata alla valutazione delle emissioni delle sorgenti industriali presenti all'interno del "Polo Chimico". Dai risultati ottenuti si evidenzia come nel periodo *night* si ha un valore critico di popolazione esposta (circa 450 a L_N≥55 dB(A)) causato dal ciclo continuo dei macchinari presenti all'interno dello stabilimento e ovviamente dai limiti più restrittivi relativi alle ore notturne.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Direttiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale.
2. Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 194, "Attuazione della direttiva 2002/49/CE relative alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale".
3. F. Asdrubali, C. Simoncini e M.Angelucci, La Valutazione della Popolazione Esposta al Rumore: Metodologie e Applicazioni nella Regione Umbria, 6°Congresso CIRIAF, Perugia, Aprile 2006.
4 F. Asdrubali, L.Frezzini, S. Ortica e C. Tosti, Stima della Popolazione Esposta al Rumore Infrastrutturale: Alcuni Casi di Studio nella Regione Umbria, 35° Congresso AIA, Giugno 2008.
5. F. Asdrubali, La Valutazione della Popolazione Esposta al Rumore lungo Infrastrutture di Trasporto, 9°Congresso CIRIAF, Perugia, Aprile 2009.
6 ISTAT, 14° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni, 2001.
7 "Parkplatzlärmstudie des Bayerischen Landesmats für Umweltschutz".
8. Pubblicazione APAT-CTN_AGF, "Rassegna finalizzata alla applicazione della Direttiva Europea, delle metodologie in uso nei paesi europei per la raccolta di dati sul rumore da traffico veicolare urbano", RTI CTN_AGF 1/2004.
9. WHO regional office for Europe: European Centre for Environment and Health, "WHO technical meeting on noise and health indicators, second meeting", 2003.
10. European centre for Environment. and Health, "Report on the second meeting on night noise guidelines", 2004.
11. S European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise, Position Paper, Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure, version 2, 13th August 2007.
12. E. Murphy, E. A. King and H. J. Rice, Estimating Human Exposure to Transport Noise in Central Dublin, Ireland", Environment International, n° 35, pp 298-302, 2009.
13 G. Brambilla, A. Poggi e G. Licitra, Indicazioni Operative per la Costruzione dell'Indicatore "Popolazione Esposta al Rumore" in Riferimento alla Direttiva 2002/49/CE, CTN_AGF, Bologna 18 Gennaio 2005

.

INTERVENTI DI RISANAMENTO E RUMORE AUTOSTRADALE A GENOVA

Alessandro Conte

Provincia di Genova – Direzione Ambiente ed Energia, Largo Cattanei, 3 – 16147 Genova
e-mail: ufficio.rumore@provincia.genova.it

SOMMARIO

Nel 2008 la Provincia di Genova ha realizzato un monitoraggio a campione, in comune di Genova, dei livelli sonori in cinque diverse zone dell'abitato prospicienti il tratto urbano della autostrada A10. L'obiettivo primario del monitoraggio è stato verificare i livelli sonori nella situazione creatasi a seguito di importanti interventi di insonorizzazione (estesi tratti di barriere con e senza coperture sommitali). Secondariamente, sono stati misurati anche i livelli sonori derivanti da alcune situazioni puntuali di non completa schermatura.

Sono state condotte sia misure settimanali del *Leq* e dei principali *Ln* orari, sia rilievi su tempo breve. Dai valori misurati sono stati estrapolati, quando l'approssimazione conseguente risultava accettabile, i corrispondenti valori su un più ampio periodo di tempo; è stata stimata, in via preliminare, l'incertezza associata sia ai dati misurati sia ai valori estrapolati.

Dall'indagine è emerso che nella maggior parte delle zone monitorate i livelli sonori testimoniano una riduzione significativa della rumorosità; sussitono ancora, comunque, situazioni suscettibili di miglioramento.

PREMESSA

In provincia di Genova sono presenti 3 assi autostradali: l'asse costiero (sdoppiato nei due tronconi della A10 da ponente al centro di Genova e della A12 dal centro a levante), l'asse Genova-Milano (A7, che corre sostanzialmente nelle valli Polcevera e Scrivia) e l'asse Genova Voltri – Alessandria (A26, che attraversa le valli Cerusa e Stura).

Nel corso del 2008 la Provincia di Genova ha realizzato un monitoraggio a campione, nell'ambito urbano di Genova, dei livelli sonori in prossimità di alcuni tratti della A10 su cui sono state istallate barriere fonoisolanti. L'iniziativa si è collocata nel solco dell'esperienza della Commissione Prefettizia "Genova Caso Pilota" sul rumore autostradale, di cui la Provincia di Genova ha fatto parte per tutto il periodo di attività della Commissione: dal 1996 a metà 2008.

L'obiettivo primario della campagna di monitoraggio è stato verificare i livelli sonori nella nuova situazione creatasi a seguito degli interventi di insonorizzazione; secondariamente, sono stati misurati anche i livelli sonori derivanti da alcune situazioni puntuali di non completa schermatura dovute alla presenza di varchi nelle strutture, sagomature particolari, fessure.

ANALISI DI DATI PREGRESSI

Sulla base dei numerosi dati di pregresse campagne di monitoraggio in diversi punti del territorio provinciale, era stato a suo tempo effettuato uno studio [1] su dati di lungo periodo teso a verificare eventuali analogie acustiche fra diverse situazioni (prossimità ad autostrade, centri urbani, periferie, centri minori, viabilità locale) e a quantificare le variabilità dei livelli sonori su base annuale e in termini di differenziale giorno / notte. Da questo studio emergeva che il differenziale *LeqD – LeqN* medio, nel caso dei siti di misura in prossimità di autostrade, era pari a 4.9 dBA con deviazione standard 0.8 dBA, con livelli *LeqD* e *LeqN* medi pari, rispettivamente a 72.3 dBA e 67.5 dBA. Questi valori statistici derivavano dall'elaborazione di dati misurati in assenza di interventi di insonorizzazione.

I LIVELLI SONORI RILEVATI

Nel presente contesto sono stati effettuati due monitoraggi plurigiornalieri in altrettanti siti prossimi al tratto genovese della A10 (uno in corrispondenza di un tratto con copertura completa ed uno con sola barriera), corredati da rilievi spot in varie postazioni. Complessivamente sono stati effettuati rilievi in 21 postazioni distinte, i due monitoraggi plurigiornalieri sono stati estesi, rispettivamente, su 28 e 20 giorni.

Le zone monitorate, da ponente a levante, sono le seguenti:

a) Via Ventimiglia (Voltri): zona priva di protezioni acustiche;
b) Via Villini Negrone (Prà): area oggetto di intervento (barriere laterali e coperture sommitali);
c) Via Villa Gavotti (Multedo – Sestri Ponente): zona priva di interventi;
d) Via Villini Rollino (Sestri Ponente): zona oggetto di intervento con barriere laterali di varia altezza e, parzialmente, coperture sommitali;
e) Via Sant'Alberto (Sestri Ponente): in corrispondenza di un tratto oggetto di intervento (barriere laterali e a tratti coperture sommitali).

In Figura 1 si riporta una indicazione schematica della successione delle zone monitorate.

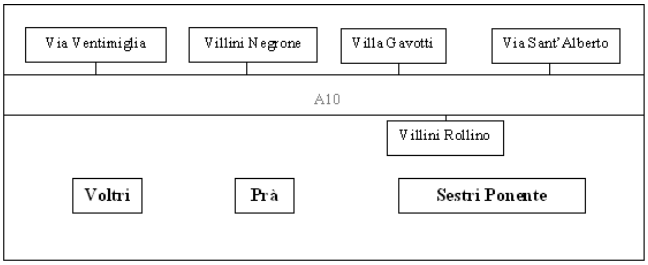


Figura1: Indicazione schematica delle zone monitorate.

I due siti di misura plurigiornaliera sono entrambi compresi in zona "via Villini Rollino", che a causa di peculiarità nella conformazione delle barriere è risultata la più critica fra quelle con interventi effettuati ed esaminate: i rilievi, infatti, hanno fornito valori di *LeqD* compresi fra circa 68 e 71 dBA e *LeqN* fra 61 e 65 dBA (giorno feriale energeticamente medio) a seconda del sito di misura ("Rollino 1" o "Rollino 2") considerato; nei giorni di sabato e domenica i livelli variano mediamente entro ~ 1.5 dBA in più o in meno a seconda dei casi.

L'incertezza statistica associata ai valori precedenti è stimabile, in riferimento al giorno feriale, in circa 0.4 dBA per il periodo diurno e 0.5 dBA per il periodo notturno.

In Figura 2 si riporta, in forma grafica, l'evoluzione temporale del *Leq* orario per i tre giorni tipo feriale, sabato e domenica monitorati nel sito Rollino 2, in presenza di una barriera di altezza modesta, nettamente inferiore alla quota del recettore considerato.

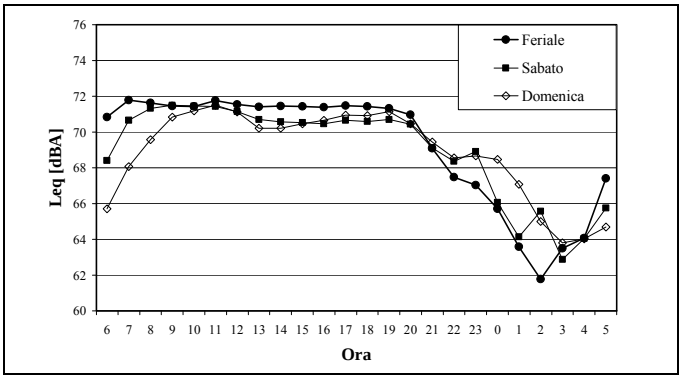


Figura 2: Evoluzione temporale del Leq orario nei giorni tipo feriale, sabato e domenica per il sito Rollino 2.

I valori sui giorni tipo, calcolati a partire da un monitoraggio settimanale – e quindi, segnatamente, per quanto riguarda il giorno feriale che risulta statisticamente più rappresentativo - possono essere considerati una approssimazione dei livelli di lungo periodo a meno di ± 1 dBA (con livello di confidenza intorno al 90%). Tale livello di confidenza è stato stimato per analogia con altre situazioni, acusticamente paragonabili, oggetto di pregresse misure su base pluriennale (rete di monitoraggio provinciale).

Relativamente al solo giorno tipo feriale, inoltre, sono stati estrapolati i valori di *LeqD* e *LeqN* ai corrispondenti valori di lungo termine (sostanzialmente la media energetica annuale) ottenendo valori pari a 67.8 e 71.4 dBA (Diurno) e 61.5 e 65.4 dBA (Notturno) rispettivamente per i siti Rollino 1 e Rollino 2. L'incertezza associata ai valori estrapolati è stata stimata in circa 0.9 dBA per il periodo diurno e 0.8 dBA per il periodo notturno.

Nelle altre zone monitorate, per alcune postazioni di misura "spot" il dato su tempo breve è stato estrapolato al livello sul tempo di riferimento Diurno. Nel caso di siti di misura in prossimità di tratti con barriere laterali e copertura sommitale, il *LeqD* estrapolato è risultato dell'ordine di 58 ÷ 60 dBA, mentre in assenza di barriera e in posizione analoga rispetto all'infrastruttura il valore del *LeqD* (estrapolato) risulta sensibilmente maggiore e pari a ~ 71 dBA, decrescendo a distanze maggiori (a una settantina di metri, ad esempio, risulta pari a ~ 68 dBA). Nel caso dei valori estrapolati di *LeqD* è stata stimata una incertezza composta (comprensiva di incertezza strumentale e incertezza di estrapolazione) compresa complessivamente in 1.4 ÷ 1.6 dBA.

I rilievi in banda di frequenza hanno consentito di verificare che l'attenuazione dovuta ad una barriera è particolarmente efficace alle frequenze medie e alte dello spettro (più precisamente, per le bande 1/3 di ottava a partire da 250 Hz), la prestazione è invece inferiore alle frequenze più basse (soprattutto al di sotto della banda 1/3 di ottava a 100 Hz): in Figura 3 si riporta il sonogramma relativo ad una misura di livello fast in corrispondenza di un tratto privo di barriere e, in Figura 4, un analogo sonogramma rilevato, invece, in presenza di barriera verticale e copertura sommitale.

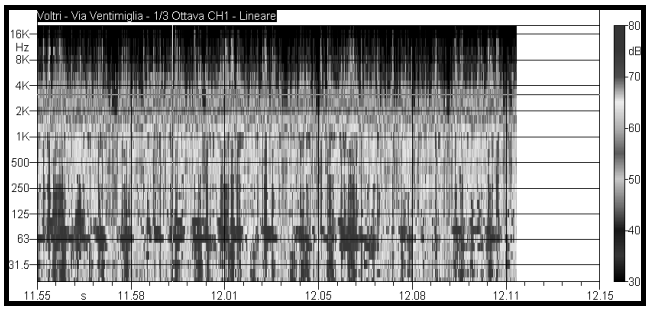


Figura3: Sonogramma del livello fast rilevato in corrispondenza di un tratto autostradale privo di barriere (ponderazione lineare, dB).

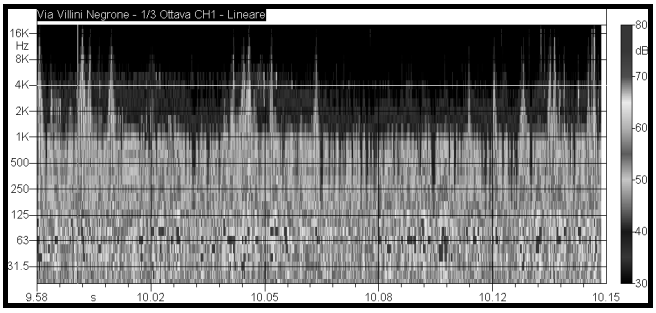


Figura 4: Sonogramma del livello fast rilevato in corrispondenza di un tratto autostradale con barriere (ponderazione lineare, dB).

Sono state effettuate diverse misure in corrispondenza di tratti autostradali con barriere che presentano alcuni varchi e/o aperture oppure fessure di varia entità (quest'ultimo caso anche in relazione alle coperture sommitali). L'indagine ha mostrato, in generale, uno scadimento puntuale delle prestazioni fonoisolanti, più accentuato nella regione delle frequenze medie.

Una utile comparazione fra spettri acustici rilevati in differenti situazioni, dal punto di vista del confronto del diverso "peso", sul livello complessivo (overall), dei contributi nelle singole bande 1/3 di ottava, può essere effettuata confrontando gli spettri "normalizzati" sottraendo al livello di

ciascuna banda il valore del *Leq* overall (ponderazione lineare). I grafici in Figura 5 evidenziano il differente contributo al *Leq* complessivo da parte dei diversi livelli di banda, in termini di spettro normalizzato, per casi distinti di rilievi in assenza di barriere ed in presenza di barriere "compatte" (ovvero con copertura sommitale ed assenza, nella parte verticale, di fessure significative e varchi): i risultati migliori si ottengono, come già ricordato, nelle parti media ed alta dello spettro.

Si osserva che, per una maggiore chiarezza grafica, gli spettri di Figura 5 (così come quelli riportati nella successiva Figura 6) sono stati limitati alle bande di frequenza 1/3 di ottava da 20 Hz a 2500 Hz.

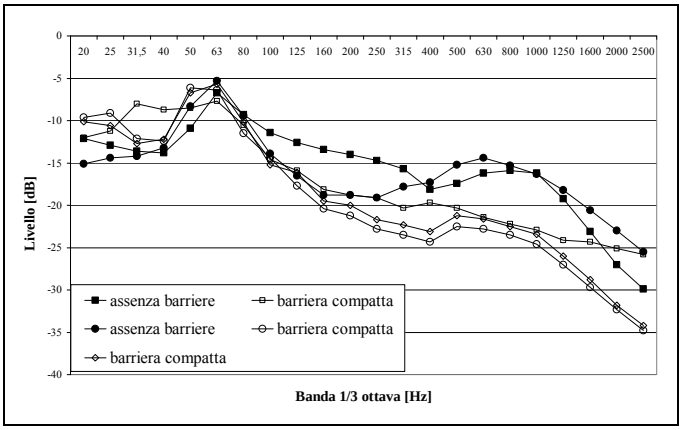


Figura 5: Confronto fra spettri di *Leq* 1/3 banda di ottava (zoom sull'intervallo 20 ÷ 2500 Hz) normalizzati al *Leq* complessivo: caso di assenza di barriere e di barriere compatte.

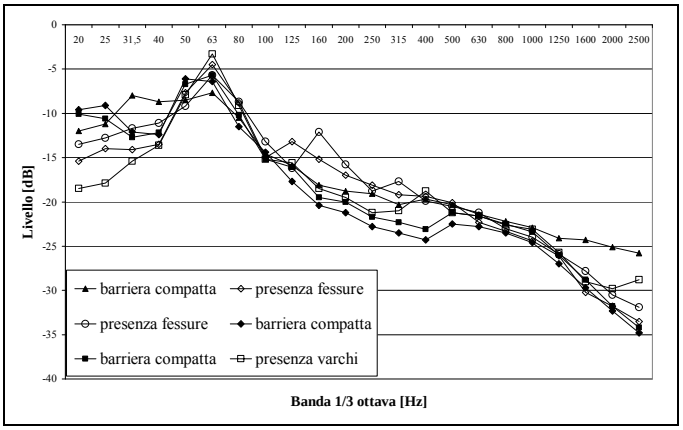


Figura 6: Confronto fra spettri di *Leq* 1/3 banda di ottava (zoom sull'intervallo 20 ÷ 2500 Hz) normalizzati al *Leq* complessivo: caso di barriere compatte e di barriere fessurate.

I grafici in Figura 6 evidenziano le differenze fra gli spettri normalizzati in alcuni casi di barriere compatte e barriere "fessurate" (le fessure o i varchi possono essere presenti sia nella parte verticale che sommitale: in quest'ultimo caso il rilievo è eseguito in posizione sopraelevata rispetto alla copertura).

Non si verificano effetti univoci, a testimonianza che l'eventuale scadimento prestazionale dipende in modo peculiare dalla forma geometrica e dall'entità delle fessure e dei varchi; comunque, la regione dello spettro in cui si verificano effetti più significativi risulta essere, nei casi monitorati, approssimativamente compresa nelle bande 1/3 di ottava 125 ÷ 400 Hz.

METODOLOGIA

Rilevamenti fonometrici

I rilievi fonometrici sono stati effettuati con strumentazione Bruel & Kjaer mod. 2238, Larson & Davis mod. 824, Larson & Davis mod. 2900 e Soundbook.

Nel caso dei rilievi plurigiornalieri in continuo le grandezze misurate sono il *Leq* e i livelli percentili *Ln* (*L1, L5, L10, L50, L90, L95 e L99*) su base oraria e ponderati A (dBA).

Le misure di tipo "spot" su tempo breve (pari o inferiore all'ora) hanno riguardato le seguenti grandezze:

1. *Leq* e livelli percentili *Ln* ponderati A;
2. evoluzione temporale dello "short" *Leq* su 0.125 s ponderato A;
3. spettro sonoro in banda di 1/3 d'ottava del *Leq* in ponderazione lineare sull'intero periodo di misura;
4. multispettro di *Leq* e *Ln* in bande 1/3 d'ottava, in ponderazione lineare e tempo di acquisizione base 1 min;
5. multispettro in bande 1/3 d'ottava e ponderazione lineare dello "short" *Leq* su 1 s.

Le misure di multispettro di cui al punto 4 sono state effettuate con la tecnica 4-DENA [2,3], acronimo di 4 *Dimensions Environmental Noise Analysis*: consiste di acquisizioni automatiche e consecutive di singoli rilievi di *Leq* in banda di frequenza e livelli percentili di banda.

Estrapolazione dei dati

Nel caso delle misure plurigiornaliere e per alcune misure su tempo breve, i dati rilevati sono stati estrapolati onde ottenere, rispettivamente, le stime di:

- $LeqD_{TL}$ e $LeqN_{TL}$ giorno tipo feriale di lungo termine, ovvero su base annuale, sui periodi diurno e notturno a partire dai valori di *LeqD* e *LeqN* rilevati durante il monitoraggio plurigiornaliero;
- *LeqD* a partire dal valore di *Leq* su tempo di misura breve (pari o inferiore a 1 h).

I valori di lungo termine $LeqD_{TL}$ e $LeqN_{TL}$ sono stati stimati a partire dai valori medi $LeqD_M$ e $LeqN_M$ ottenuti come medie logaritmiche dai valori di *Leq* direttamente misurati, assumendo in ipotesi che sussista la seguente semplice relazione:

$$Leq_{TL} = Leq_M + \delta \qquad (1)$$

La quantità δ è stata stimata utilizzando dati pregressi di monitoraggio plurigiornaliero effettuati su periodo annuale, rilevati presso una stazione di monitoraggio di una strada urbana ("Gastaldi"), in comune di Genova (anno di riferimento 1998) che si ritiene approssimi il tratto urbano della A10 in relazione alle caratteristiche macroscopiche dell'evoluzione dei livelli *Leq* [1].

Più precisamente, la quantità δ è stata stimata confrontando, per il caso di Gastaldi, il *Leq* di lungo termine (Diurno e Notturno) con i livelli corrispondenti determinati a partire da campioni di dati settimanali, costituiti da 5 giorni feriali successivi (non necessariamente nella stessa settimana).

Dai 261 giorni feriali (che hanno fornito i valori *LeqD* e *LeqN* annuali per il giorno feriale) sono stati in tal modo estratti 257 campioni formati da 5 giorni feriali "successivi" da cui sono stati calcolati i livelli equivalenti $LeqD_{sett}$ e $LeqN_{sett}$ "settimanali".

Il confronto statistico è stato effettuato calcolando lo scarto medio fra livello *Leq* "settimanale" e livello a lungo termine (e la corrispondente deviazione standard) considerando tre periodi distinti: globale, "stagione fredda" da ottobre a giugno, "stagione calda" da luglio a settembre.

La media degli scarti è compresa, per i tre periodi, da -0.5 a +0.1 dBA con deviazione standard 0.4 ÷ 0.8 dBA.

Per l'estrapolazione dei dati plurigiornalieri ai corrispettivi livelli a lungo termine sono stati utilizzati come valori empirici di δ gli scarti medi relativi al periodo "freddo", considerato il più appropriato.

Considerando il solo periodo "freddo", inoltre, l'analisi statistica degli scarti mostra che circa il 92% dei dati $LeqD_{sett}$ e $LeqN_{sett}$ approssimano il livello equivalente a lungo termine con uno scarto compreso nell'intervallo -1 ÷ +1 dBA.

In Figura 7, ad esempio, si riportano le curve statistiche cumulate degli scarti fra livello equivalente settimanale (feriale) Diurno e Notturno ed il corrispondente livello a lungo termine per l'intero insieme dei dati esaminati (campione annuale).

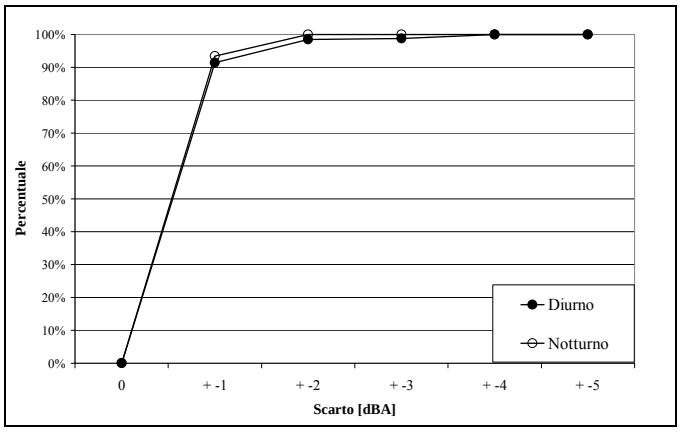


Figura 7: Distribuzioni statistiche cumulate degli scarti fra *Leq* "settimanale"feriale e *Leq* a lungo termine sui periodi di riferimento.

Per alcune postazioni di misura "spot" su tempo breve, in cui il livello fonometrico risente in modo fondamentale delle immissioni autostradali e non è influenzato significativamente da situazioni peculiari, è stato estrapolato il livello *LeqD*, onde ottenere un dato confrontabile con i limiti previsti dalla normativa.

Il valore del *LeqD* è stato stimato a partire dal corrispondente valore su tempo breve assumendo in ipotesi che sussistano le seguenti semplici relazioni:

– stima di *LeqD* da un dato fonometrico orario:

$$LeqD = Leqh + \delta_h \qquad (2)$$

– stima di *LeqD* da un dato fonometrico su 15':

$$LeqD = Leqh^* + \delta_h \qquad (3)$$

dove $Leqh^*$ è a sua volta un valore stimato a partire dal dato fonometrico su 15 min utilizzando la relazione:

$$Leqh^* = Leq15 + \delta_{15} \qquad (4)$$

Le quantità δ_k sono state determinate sperimentalmente nel modo di seguito descritto.

Come dati sperimentali sono stati utilizzati quelli rilevati nella campagna di monitoraggio effettuata nel sito Rollino 2. Per determinare lo scarto δ_h si è proceduto, innanzi tutto, considerando lo scarto:

$$\delta h_i = Leqh_i - LeqTR \qquad (5)$$

dove $Leqh_i$ è il livello orario (h=0–23) nell'i-esimo giorno feriale (il numero totale di giorni considerati è 15) e *LeqTR* è il livello equivalente complessivo nel periodo di riferimento elaborato a partire dai dati orari. Pertanto si sono calcolati i diversi scarti alle diverse ore e nei diversi giorni, calcolando la media e la deviazione standard degli scarti ora per ora, ottenendo in tal modo l'informazione su quanto mediamente un valore di *Leq* orario, per una data ora, sottostimi o sovrastimi il livello equivalente nel periodo di riferimento, quantificando la dispersione in termini di deviazione standard.

I rilievi spot sono quindi stati estrapolati al valore sul tempo di riferimento utilizzando il valore dello scarto medio relativo all'ora di misura.

Se il dato di partenza deriva da un rilievo effettuato su base temporale 15 minuti, per passare da un livello equivalente spot *Leq15* al livello sul tempo di riferimento diurno *LeqD* è stato necessario effettuare un passaggio in più (Eq. (4)), determinando un livello orario *Leqh** a partire da un rilievo su tempo inferiore all'ora e ripetere le operazioni precedenti a partire non da un livello orario misurato ma stimato.

Il termine additivo per estrapolare a 60 min il dato fonometrico su 15 min è stato ricavato dall'analisi di una misura spot eseguita presso il sito Rollino 2, con cui sono stati acquisiti, in parallelo, lo short *Leq* su 0.125 s e il *Leq* progressivo. A partire da questi dati sono stati calcolati gli scarti fra tutti i possibili *Leq15* e *Leq* orario, ottenendo uno scarto medio pari a 0.0 dBA e deviazione standard 0.2 dBA; la corrispondente distribuzione statistica è riportata in Figura 8.

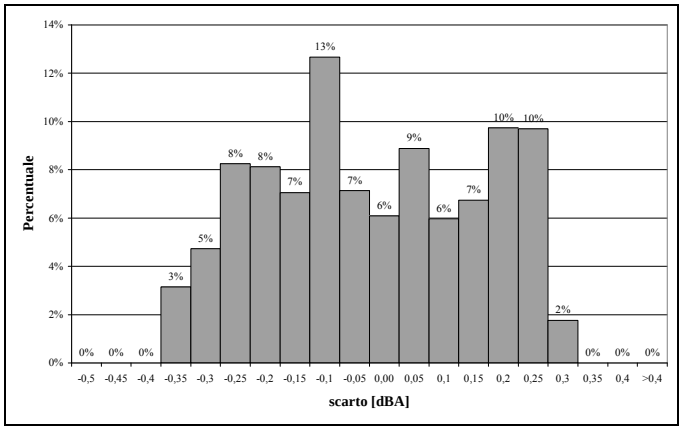


Figura 8: Distribuzione statistica degli scarti fra *Leq15* e *Leq* orario.

Stima della incertezza

Per quanto possibile sono state applicate, in via preliminare, procedure per la stima dell'incertezza nelle misurazioni in ambiente esterno, sviluppate sulla base dei contenuti della norma UNI CEI ENV 13005:2000 "Guida all'espressione dell'incertezza di misura" e di quanto riportato in letteratura sull'argomento [4,5,6,7].

Nel caso delle misure plurigiornaliere la valutazione dell'incertezza da associare alle misurazioni è stata effettuata con considerazioni di tipo statistico (categoria A), in considerazione della sostanziale ripetitività e modesta variabilità del fenomeno acustico in esame, in coerenza con quanto prospettato nelle "Linee guida per la progettazione di reti di monitoraggio e per il disegno di stazioni di rilevamento relativamente all'inquinamento acustico" ANPA [6].

In questo spirito, la valutazione è stata limitata ai giorni feriali, statisticamente più rappresentativi e caratterizzati da una buona ripetitività del fenomeno sonoro, stimando il valore dell'incertezza da associare ai livelli equivalenti sul tempo di riferimento per il giorno medio approssimandolo come incertezza sulla media (u_σ).

I valori dell'incertezza in tal modo attribuita ai valori di *LeqD* e *LeqN* giorno tipo feriale per i due siti di misura Rollino 1 e Rollino 2 sono compresi in 0.2 ÷ 0.5 dBA.

Nel caso del valore estrapolato di lungo periodo, l'incertezza complessiva u_c si compone del termine già descritto (u_σ) e dell'incertezza associata alla procedura di estrapolazione (u_{TL}) secondo la legge quadratica:

$$u_c = \sqrt{u_\sigma^2 + u_{TL}^2} \qquad (6)$$

L'incertezza u_{TL} è legata alla stima dei valori a lungo termine del Leq a partire da campionamenti limitati nel tempo, generalmente settimanali.

La stima di u_{TL} è stata ricavata dall'analisi statistica effettuata sui dati annuali rilevati nella stazione Gastaldi, confrontando il livello equivalente di lungo periodo (diurno e notturno) determinato a partire dai *Leq* orari per 261 giorni feriali con i *LeqTR* determinati a partire da campioni di dati settimanali costituiti da 5 giorni feriali consecutivi, ottenendo valori compresi fra 0.6 ÷0.8 dBA. L'incertezza composta del valore estrapolato, pertanto, risulta compresa (a seconda del sito di misura e del periodo di riferimento) fra 0.7 ÷ 0.9 dBA.

Nel caso delle misure spot è stata primariamente considerata l'incertezza strumentale u_{strum} (che non comprende le incertezze dovute all'operatore e al posizionamento dello strumento), per la quale si è assunto il valore di letteratura di 0.5 dBA [5,7].

Nel caso dei valori estrapolati al periodo Diurno (a partire da misure orarie o su 15 min) deve essere considerata l'incertezza composta u_c che tiene conto anche delle incertezze introdotte dalle procedure di estrapolazione.

Complessivamente il livello estrapolato *LeqD** da una misura oraria ha una incertezza composta data almeno da:

$$u_c = \sqrt{u^2_{strum} + u^2_{\delta h}} \qquad (7)$$

Se, invece, il dato fonometrico di partenza deriva da un rilievo su base temporale 15 min, il passaggio preliminare dal livello *Leq15* al livello estrapolato orario *Leqh** (Eq. (4)) comporta una ulteriore incertezza $u_{\delta 15}$. Pertanto il valore estrapolato *LeqD**, in questo caso, è affetto da una incertezza u_c data da:

$$u_c = \sqrt{u^2_{strum} + u^2_{\delta 15} + u^2_{\delta h}} \qquad (8)$$

I termini parziali dell'incertezza sono stati stimati sulla base di elaborazioni statistiche che hanno permesso di quantificare l'accuratezza della stima del livello equivalente sul tempo di riferimento diurno in questo caso a partire da un dato spot su tempo breve (≤ 1h).

L'incertezza quantificata con il termine $u_{\delta 15}$ deriva dall'estrapolazione di un dato di livello equivalente misurato su base temporale di 15 min a un livello equivalente orario.

L'incertezza $u_{\delta h}$ deriva dall'operazione di estrapolazione di un valore di livello equivalente su 1 ora al corrispondente valore di livello equivalente determinato su tutto il periodo corrispondente di riferimento, in questo caso il diurno essendo le misure effettuate in periodo 6:00 ÷ 22:00.

Più precisamente, l'incertezza $u_{\delta h}$ è stata determinata elaborando statisticamente un campione di dati estratto dal monitoraggio in continuo "Rollino 2" (rappresentativo di un rumore sostanzialmente "quasi-stazionario", condizione rilevata anche nelle misure spot a cui si applicano le procedure sulle incertezze) costituito da serie di dati orari di livello equivalente giornalieri feriali.

Il campione di dati per determinare l'incertezza $u_{\delta 15}$ è costituito da una misura su circa 2 h effettuata presso la postazione Rollino 2, l'elaborazione statistica alla base della stima dell'incertezza è già stata descritta in relazione alla procedura di estrapolazione.

Le incertezze composte in tal modo determinate sono comprese, a seconda del sito, fra 1.4 ÷ 1.6 dBA.

Relativamente al posizionamento del microfono, è stata soltanto valutata, a parte, l'incertezza sulle coordinate (Gauss Boaga, espresse in m) associate ai punti di misura, distinguendo i due casi di misura plurigiornaliera e misura su tempo breve: in quest'ultimo caso, infatti, si è ritenuto che la procedura di individuazione delle coordinate (eseguita successivamente in ufficio tramite cartografia informatizzata) risenta di una maggiore indeterminatezza dovuta al posizionamento della strumentazione in campo aperto anziché su balcone di civile abitazione. Adottando una valutazione di categoria B, l'incertezza sulle coordinate dei punti di misura (dovuta al solo procedimento di individuazione, senza tenere conto dell'incertezza intrinseca alla cartografia digitale) è stata stimata pari a ~ 2 m per le misure su tempo breve e ~ 1 m per le misure plurigiornaliere (per ciascuna coordinata).

CONCLUSIONI

Il complesso della campagna di misure ha quindi evidenziato, in sintesi, che in assenza di interventi di insonorizzazione i *Leq* rilevati sono indicativi o di supero dei valori limite o di rilevante criticità, mentre in presenza di interventi di insonorizzazione sono risultate, per le zone esaminate, situazioni differenti:

- nella maggior parte dei casi si è verificata una sostanziale efficacia dell'intervento, pur in presenza di qualche scadimento puntuale delle prestazioni della struttura insonorizzante;
- in un caso i rilievi hanno evidenziato la scarsa efficacia dell'intervento, ragionevolmente a causa di sagomature o altezze di barriera non adeguate.

Nel caso di interventi di insonorizzazione effettivamente efficaci, si può stimare un beneficio, valutato come differenziale fra valori medi di *LeqD* in assenza ed in presenza di barriere, dell'ordine di ~ 10 ÷ 13 dBA per i recettori più prossimi ai tratti di infrastruttura considerata.

Dal punto di vista spettrale, in genere l'effetto mitigativo più efficace si è rilevato nelle bande di 1/3 ottava medie ed alte a partire da 250 Hz; la presenza di fessure o varchi provoca, per i casi esaminati, uno scadimento puntuale delle prestazioni dell'intervento (rimane comunque sostanzialmente mantenuto il beneficio generale), soprattutto nell'intervallo di bande di frequenza 1/3 ottava 125 ÷ 400 Hz. Questo effetto leggermente selettivo dal punto di vista della frequenza, potrebbe concorrere al disturbo percepito ed essere uno dei motivi che hanno dato origine ad alcune segnalazioni da parte della cittadinanza.

La stima dell'incertezza e l'applicazione di semplici procedure estrapolative, entrambe qui sviluppate in via preliminare, saranno oggetto in futuro di più sistematiche ed approfondite applicazioni.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. A. Conte e M. Balzano, Confronto sistematico fra livelli acustici di lungo periodo in diversi contesti antropizzati, Atti 7° Convegno Nazionale CIRIAF – Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici, pagg. 169-174, 2007.
2. A. Cerniglia, 4-DENA: un nuovo potente mezzo di indagine acustica, *L'Ambiente*, anno IV n. 3, pagg. 28-29, 1997.
3. A. Cerniglia, Individuazione di sorgenti di rumore in un clima acustico complesso: un caso reale, *Antinquinamento*, Anno V N.1, pagg. 46-49, 1998.
4. F. Andolfato, Calcolo dell'incertezza nelle misure di rumore ambientale, Atti 31° Convegno Nazionale AIA - Associazione Italiana di Acustica, pagg. 579-582, 2004.
5. M. Garai, Espressione dell'incertezza in acustica applicata: stato dell'arte e prospettive, Atti 35° Convegno Nazionale AIA - Associazione Italiana di Acustica, 2008.
6. A. Poggi, C. Fagotti, D. Casini, T. Manciocchi e T. Gabrieli, Linee guida per la progettazione di reti di monitoraggio e per il disegno di stazioni di rilevamento relativamente all'inquinamento acustico, ANPA, RTI CTN_AGF 3/2001, 2001.
7. S. Radaelli, E. Quaia e G. Zambon G., Incertezza delle misure acustiche in ambiente esterno, Atti 35° Convegno Nazionale AIA - Associazione Italiana di Acustica, Milano, 2008.

NOMENCLATURA

Leq	livello continuo equivalente (dB o dBA)
Leqk	*Leq* su uno specifico tempo *k* (dBA)
*Leq**	generico valore di *Leq* estrapolato (dBA)
LeqTR	*Leq* sul periodo diurno o notturno (dBA)
LeqD	*Leq* nel periodo diurno 6 ÷ 22 (dBA)
LeqN	*Leq* nel periodo notturno 22 ÷ 6 (dBA)
$LeqD_{TL}$	*LeqD* estrapolato a lungo termine (dBA)
$LeqN_{TL}$	*LeqN* estrapolato a lungo termine (dBA)
$LeqD_{M}$	*LeqD* medio (dBA)
$LeqN_{M}$	*LeqN* medio (dBA)
$LeqD_{sett}$	*LeqD* medio su settimana campione (dBA)
$LeqN_{sett}$	*LeqN* medio su settimana campione (dBA)
Ln	livello n-esimo percentile (dB o dBA)
δ	termine additivo di estrapolazione (dBA)
u_c	incertezza composta (dBA)
u_k	componente k-esima di incertezza (dBA)

INDAGINE SUL RUMORE PORTUALE A GENOVA

Alessandro Conte

Provincia di Genova – Direzione Ambiente ed Energia, Largo Cattanei, 3 – 16147 Genova
e-mail: ufficio.rumore@provincia.genova.it

SOMMARIO

La Provincia di Genova dal 2005 ha avviato una indagine fonometrica del rumore portuale, attività intensificata nel biennio 2008 – 2009 e tutt'ora in corso di sviluppo. Obiettivi principali del monitoraggio sono la verifica dei livelli sonori presenti in alcune zone abitate prossime ad importanti infrastrutture portuali e l'individuazione di un approccio tecnico adeguato per il caso peculiare di Genova.

Oggetto del presente articolo sono i risultati dell'indagine fonometrica in due distinte aree urbane esposte alle emissioni acustiche dalle infrastrutture portuali del Porto Petroli e del Terminal Traghetti nella città di Genova.

La campagna di monitoraggio ha contemplato sia rilievi continui plurigiornalieri sia misure "spot" su tempo breve (in pratica inferiori o pari a 1 ora). Una particolare attenzione è stata prestata ad eseguire rilievi (anche di lungo periodo) in banda di frequenza, ritenuti indispensabili per poter discriminare i contributi della sorgente acustica "porto", nei casi esaminati di tipo quasi stazionario e con alcune bande di emissione caratterizzabili, dal complesso delle altre immissioni acustiche dovute al contesto urbano in cui è stata effettuata l'indagine fonometrica.

PREMESSA

Il tema delle immissioni di rumore da navi all'ormeggio sull'abitato circostante è oggetto di diversi studi, alcuni dei quali piuttosto recenti e relativi alla situazione italiana [1,2,3].

La Provincia di Genova aveva in passato fatto parte di un gruppo di lavoro, a carattere locale, che aveva analizzato alcune problematiche derivanti dalla movimentazione dei container in un importante Terminal genovese [4].

In generale si può affermare che, dal punto di vista dell'impatto acustico sull'abitato, i temi principali sono spesso riconducibili a: motori delle navi, operazioni di carico e scarico (pompaggio di fluidi, movimentazione container, etc.) e traffico indotto. In diversi casi può essere anche rilevante l'immissione acustica da parte di sorgenti di tipo industriale connesse al porto (ad esempio cantieri).

Dal 2005 la Provincia di Genova ha avviato uno studio sistematico delle immissioni acustiche di origine portuale sull'abitato: ad oggi sono state analizzate alcune aree in comune di Genova e lo studio è in corso di approfondimento.

L'impatto acustico del porto di Genova, notoriamente uno dei principali del Mediterraneo, sulla parte residenziale della città è limitato ad alcune porzioni di essa: in primo luogo per la conformazione urbana che presenta importanti infrastrutture veicolari e ferroviarie lungo la costa e l'inserimento, sempre sulla linea di costa, di importanti infrastrutture industriali e dell'Aeroporto, ciascuna delle quali costituisce, con grado differente di impatto, una sorgente sonora in molti casi schermante il rumore di origine portuale.

Inoltre, fra aree portuali e abitato è interposta per larghi tratti una sorta di "barriera", costituita da insediamenti sia edili (capannoni, altre costruzioni) sia industriali che costituiscono un ostacolo alla propagazione sonora.

Pertanto, le zone residenziali più critiche consistono in alcune aree urbane prossime a zone portuali rumorose, in assenza di strutture schermanti interposte e con impatto acustico limitato da altre sorgenti (in primo luogo il traffico).

La rumorosità di origine portuale nella maggior parte dei casi è maggiormente avvertibile, come è lecito attendersi, allorché il flusso veicolare sulle strade urbane si riduce su valori più bassi e, quindi, nelle fasce orarie notturne.

I rilievi eseguiti hanno confermato che l'entità (livello complessivo) e la qualità (componenti spettrali) delle immissioni acustiche dovute alle navi sono piuttosto variabili a seconda delle navi ormeggiate e in relazione al numero di navi presenti (di solito variabile). Queste considerazioni, oltre al fatto che i rilievi avvengono in ambiente urbano con contributi acustici dovuti ad altre sorgenti antropiche, suggeriscono l'opportunità, al fine di meglio caratterizzare il fenomeno "porto", di eseguire rilievi in banda di frequenza e su un arco di tempo adeguatamente esteso (in continuo o per campionamento).

Dal punto di vista normativo, per quanto riguarda le immissioni acustiche portuali il quadro non è ancora definito: è in attesa di emanazione, infatti, il decreto previsto dalla Legge Quadro n. 447/1995 relativo alla definizione delle fasce di pertinenza portuale e relativi limiti assoluti (in analogia, ad esempio, a quanto previsto per le infrastrutture stradali); d'altro canto il d.P.C.M. 14.11.1997 esclude le infrastrutture portuali dall'applicazione del criterio differenziale.

Al momento, pertanto, l'unico termine di riferimento è costituito dai valori limite introdotti con la classificazione acustica, peraltro di dubbia applicabilità permanendo l'indeterminatezza relativamente alla definizione delle fasce di pertinenza in cui dovrebbero valere limiti propri per le immissioni di tipo portuale.

LE ZONE MONITORATE

Per il presente studio sono state considerate due zone abitate, all'interno del tessuto urbano genovese, in prossimità rispettivamente di due importanti infrastrutture portuali:

1. area Multedo: quartiere ubicato nel ponente cittadino, è contigua alla infrastruttura del Porto Petroli; fra le principali sorgenti di immissioni sonore sull'abitato, dovute alla presenza del porto, si sono rivelate le emissioni sonore relative al funzionamento di impianti di pompaggio e ai motori delle navi all'ormeggio;
2. area Dinegro: prossima al centro città, è contigua al Terminal Traghetti; le principali immissioni sonore sull'abitato connesse al Terminal sono date dai motori delle navi all'ormeggio.

La classificazione acustica attualmente vigente per le aree abitate più prossime alle due infrastrutture portuali considerate è la seguente:

1. Multedo: classi IV (zone più vicine al porto) e III (prevalentemente zona collinare);
2. Dinegro: classi V, IV e III (nell'area collinare più distante dal porto).

L'abitato di Multedo, inoltre, è interessato dalle immissioni acustiche determinate da importanti infrastrutture di trasporto: la strada Aurelia, l'autostrada A 10 con relativo svincolo, la ferrovia Genova - Ventimiglia, l'aeroporto C. Colombo. Le principali sorgenti di rumore afferenti all'esercizio delle attività nel Porto Petroli, pompaggio e motori delle navi, sono essenzialmente di tipo continuo e stazionario. Sulla base delle segnalazioni da parte della cittadinanza, il disturbo provocato dalle navi risulta apprezzabile soprattutto durante il periodo notturno ed in zone dell'abitato che si trovano in collina.

L'area Dinegro è interessata da numerose ed importanti sorgenti sonore diverse dalle navi all'ormeggio nel Terminal Traghetti: oltre al traffico pesante, indotto dal complesso delle infrastrutture portuali in loco e alle numerose attività, anche di tipo industriale, svolte in ambito portuale, la zona abitata risente in modo fondamentale delle immissioni acustiche veicolari provenienti dall'Aurelia e da alcune strade secondarie, nonché della rumorosità dovuta alla ferrovia Genova – Ventimiglia.

Per il caso di Multedo sono state effettuate simulazioni numeriche di propagazione del rumore, considerando quali sorgenti acustiche ipotetiche navi ormeggiate, con il solo scopo di verificare a livello qualitativo la diversa esposizione delle zone abitate del quartiere immediatamente a ridosso del porto (in input al codice di calcolo sono stati utilizzati livelli di potenza del tutto fittizi e di valore "unitario").

Il modello ha confermato le considerazioni soggettive già acquisite sulle diverse criticità riscontrabili nell'abitato. In Figura 1 si riporta in forma grafica il risultato di una delle simulazioni eseguite (le zone con i livelli più bassi corrispondono al colore verde, quindi seguono la scala cromatica dal giallo al rosso ed al violetto).

METODOLOGIA

Multedo: siti di misura

Sono stati effettuati rilievi plurisettimanali in tre siti distinti ubicati: sulla strada Aurelia (VR) e lungo una strada locale che si snoda sulla collina (VC1 e VC2).

A corredo sono state inoltre realizzate 20 misure spot su tempo breve (da circa 15 min a circa 1 h); queste ultime in 3 siti (S1, S2 e S3 nel seguito) sono state ripetute in date ed orari diversi. In tutto i siti distinti interessati da misure su tempo breve sono 6.

Le campagne di monitoraggio in continuo sono state realizzate alloggiando la strumentazione automatica in cabine della rete provinciale di monitoraggio (VR e VC2) oppure in un box posizionato su balcone privato (VC1).

In Figura 2 si riportano schematicamente le posizioni dei siti di misura plurisettimanali (VR, VC1, VC2) e su tempo breve più significativi rispetto all'infrastruttura portuale (S1, S2, S3, S4); sono evidenziati anche i tracciati dell'Aurelia (colore blu) e della ferrovia (colore rosso), che corre in sopraelevazione su massicciata.

I dati rilevati nell'anno 2005 nei siti VR e VC1 erano stati oggetto di uno studio preliminare finalizzato a individuare un sito ottimale, compatibilmente con le necessità logistiche, per il monitoraggio in continuo della rumorosità ambientale con un contributo portuale evidenziabile: la successiva (2007) installazione della cabina fissa di monitoraggio VC2 ha tenuto conto anche di queste indicazioni.

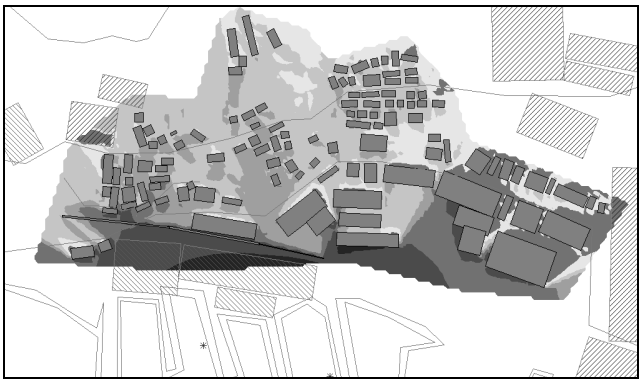


Figura 1: Multedo: simulazione della distribuzione spaziale della rumorosità dovuta ad ipotetiche navi all'ormeggio.

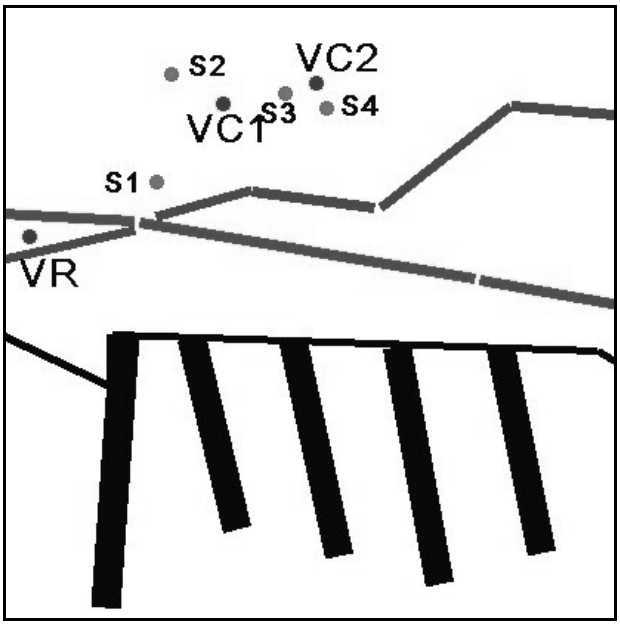


Figura 2: Multedo: posizione schematica dei principali siti di misura.

Dinegro: siti di misura

Per questa area lo studio è al momento ad uno stadio meno avanzato rispetto alla zona Multedo che, sia per la disponibilità di cabine di monitoraggio già attrezzate sia per pregresse segnalazioni da parte di residenti, è stata prioritariamente oggetto di monitoraggio.

Nel caso della zona Dinegro, quindi, sono state finora realizzate alcune misure preliminari e propedeutiche a successivi approfondimenti; i rilievi, tutti su tempo breve, sono stati effettuati in tre siti distinti collocati lungo la passeggiata pedonale della "Lanterna", direttamente affacciata sul porto, che partendo da una posizione molto prossima alle infrastrutture del Terminal Traghetti si snoda lungo il fronte portuale verso ponente, giungendo al faro di Genova (Lanterna) ed in prossimità della centrale termoelettrica.

I rilievi sono stati eseguiti in tre siti: il primo (P1), poco dopo l'imbocco della passeggiata, è il più significativo in relazione alle immissioni dalle navi all'ormeggio presso il Terminal Traghetti; il secondo sito di misura (P2) è posto ad una distanza approssimativamente intermedia fra il Terminal Traghetti e la Lanterna e risente anche delle immissioni sonore dovute al traffico pesante indotto dal porto; il terzo sito (P3) è situato ai piedi della rocca su cui si erge il faro ed è interessato anche da rumore di tipo industriale proveniente dal complesso in cui è inserita la centrale termoelettrica.

Rilievi fonometrici

I rilievi fonometrici sono stati effettuati utilizzando la seguente strumentazione: Bruel & Kjaer mod. 2238, Larson & Davis 824, Larson & Davis 2900 e Soundbook.

Nel caso dei rilievi plurisettimanali nei siti VR e VC1 le grandezze misurate sono il livello continuo equivalente *Leq* e i livelli percentili *Ln* (*L1*, *L5*, *L10*, *L50*, *L90*, *L95* e *L99*) orari oppure su 30 min ponderati A (dBA).

La campagna di misura nel sito VR si è estesa a più riprese e complessivamente su 13 mesi dal 2005 al 2008. Il monitoraggio nel sito VC1, più limitato nel tempo, è durato 16 giorni nei mesi di agosto e settembre dell'anno 2005.

Nel caso dei rilievi plurisettimanali nel sito VC2, invece, sono stati acquisiti in parallelo i livelli orari *Leq* e *Ln* ponderati A (dBA) e i multispettri in ponderazione lineare del *Leq* e della statistica di banda *Ln* su base oraria (dB); queste ultime acquisizioni sono state effettuate ricorrendo alla tecnica 4 DENA [5,6], acronimo di *4 Dimensions Environmental Noise Analysis*: consiste di acquisizioni automatiche e consecutive di singoli rilievi di Leq in banda di frequenza e livelli percentili di banda. La campagna di monitoraggio nel sito VC2, si è estesa dal mese di febbraio al mese di maggio del 2008.

Nel caso delle misure su tempo breve (pari o inferiore all'ora) sono state determinate (in parallelo o alternativamente a seconda dei casi) le seguenti grandezze principali:

1. *Leq* e *Ln* ponderati A (dBA),
2. evoluzione temporale del *Leq* su 0.125 s (dBA),
3. spettro sonoro in banda di 1/3 d'ottava del *Leq* in ponderazione lineare sull'intero periodo di misura (dB),
4. multispettro in bande 1/3 d'ottava e ponderazione lineare del *Leq* su 1 s (dB).

Le misure spot sono state effettuate a più riprese, nella maggior parte nel 2008 e nel 2009 per Multedo e nel 2009 per Dinegro.

Le misure di multispettro su periodo plurisettimanale nel sito VC2 hanno consentito di meglio indagare la rumorosità ambientale rispetto ai monitoraggi di tipo tradizionale nei siti VR e VC1: nel caso in questione, infatti, il fenomeno sonoro presenta una natura complessa, a motivo della presenza di varie sorgenti più o meno persistenti e con ampi intervalli temporali di contemporaneità: traffico locale, eventi sonori antropici di varia natura, immissioni acustiche dal porto, rumore proveniente sia dalla viabilità principale (Aurelia) sia dalla ferrovia per quanto per largo tratto schermate, rumorosità di fondo dalle caratteristiche di lungo raggio proveniente dal complesso della struttura urbana in cui Multedo è inserita.
Si è quindi resa necessaria una analisi statistica dei livelli monitorati, il cui metodo principale è di seguito descritto.
Sulla base dei dati gentilmente forniti dalla Società Porto Petroli di Genova SpA sulla movimentazione delle navi, sono stati separati i dati corrispondenti a periodi con una o più navi ormeggiate e quelli riferiti a periodi senza navi, per ogni mese di monitoraggio e per le sole ore notturne (nella fascia oraria 0 ÷ 6, più ristretta del periodo notturno definito da normativa, onde escludere fenomeni sonori rilevanti non portuali che, dall'analisi dell'insieme dei dati, risultano ricorrenti anche fra le 22 e le 24). Quindi, per ogni campione così ottenuto sono state calcolate le distribuzioni statistica e cumulata dei livelli 99-esimo percentile di banda. Le bande di frequenza ritenute statisticamente più "significative", in relazione alle immissioni sonore portuali, sono state così identificate:

1. si è individuato il valore del livello per cui una delle due curve cumulate raggiunge per prima il 100% (nei casi esaminati è sempre la curva del campione senza navi);
2. si è calcolata la percentuale di dati relativi al campione con navi che eccedono il livello sopra individuato;
3. si è classificata la banda come abbastanza significativa se la percentuale così calcolata è superiore a 50% e significativa se è superiore a 70%.

Simulazioni numeriche

L'obiettivo principale delle simulazioni è stato di ordine preliminare e metodologico, soprattutto volto ad individuare le aree abitate di Multedo più esposte al rumore navale.

E' stato utilizzato il software Predictor commercializzato dalla ditta Bruel & Kjaer, contenente diversi algoritmi atti a simulare la rumorosità prodotta da differenti tipi di sorgenti; in questo caso è stato utilizzato l'algoritmo basato sulla norma ISO 9613/2 (Attenuation of sound during propagation outdoors - General method of calculation).

Le sorgenti di rumore sono costituite da ipotetiche navi all'ormeggio e come livello di potenza in input è stato simulato, per tutte le navi di volta in volta considerate, un valore fittizio "unitario". Sono state poi simulate diverse configurazioni, con una o più navi all'ormeggio.

Per la modellizzazione del territorio si è digitalizzata l'orografia con curve di isolivello di quota s.l.m. ogni 25 - 50 m di dislivello (con alcuni infittimenti) e sono stati schematizzati gli edifici e gli ostacoli principali. Sono state simulate griglie di recettori con spaziature regolari di varia ampiezza ed altezza dal suolo. La grandezza calcolata in output è interpretabile come *Leq* orario (dBA).

I LIVELLI SONORI RILEVATI

Lo studio preliminare nell'area di Multedo

L'ubicazione della cabina di monitoraggio VC2, che ospita anche strumentazione per la misura della qualità dell'aria, era stata individuata anche in considerazione di uno studio

preliminare effettuato su rilievi effettuati in contemporanea nei due siti VR e VC1.
Tale studio aveva evidenziato che:

– il sito VR è interessato da livelli *Leq* influenzati in modo determinante dal traffico veicolare lungo l'Aurelia;
– il sito VC1 conferma che la zona collinare è idonea per l'installazione di una cabina presso cui effettuare monitoraggi in continuo finalizzati anche a stimare le immissioni acustiche di origine portuale.

La cabina VR, infatti, è ubicata in un ampio piazzale a filo carreggiata della strada Aurelia; alle spalle della cabina, verso monte, corre parzialmente schermata la linea ferroviaria Genova - Savona (sopraelevata). Sull'altro lato della strada, oltre alcuni edifici, vi sono le infrastrutture portuali. Viceversa, il sito VC1 è ubicato in corrispondenza di una strada locale sulla collina di Multedo, parzialmente schermata rispetto all'Aurelia ed alla ferrovia ma non rispetto al porto: lungo la stessa strada è stata ubicata la cabina VC2.

Onde quantificare le differenze fra i livelli sonori monitorati in VR e VC1, con l'obiettivo di verificare l'idoneità della zona collinare per il successivo monitoraggio in continuo, lo studio preliminare aveva primariamente considerato i livelli rilevati in orario notturno, più adatti per evidenziare fenomeni sonori quasi stazionari quali immissioni acustiche eventualmente provenienti dall'area portuale.

L'analisi statistica di *Leq* e *Ln* ponderati A rilevati nei siti VR e VC1 ha posto in evidenza la sostanziale disomogeneità acustica dei due siti; la correlazione maggiore fra i dati monitorati si ottiene nel caso di *L10* (fattore di correlazione pari a 0.74) e quindi di *Leq* (0.71), quindi la correlazione diminuisce rapidamente all'aumentare dell'ordine del percentile risultando minima per *L99* (0.31).

La scarsa correlazione nei livelli di fondo aveva fornito una ulteriore indicazione della maggiore idoneità dell'area collinare al monitoraggio di fenomeni sonori associati al porto.

Il monitoraggio in area Multedo: risultati

Nelle tabelle 1, 2 e 3 si riportano i livelli *LeqD* e *LeqN* (dBA) per i tre giorni tipo (feriale, sabato e festivo) "energeticamente" medi relativi ai siti VR, VC1 e VC2.

In Figura 3 si riportano i grafici del *Leq* orario (dBA) relativamente al giorno feriale tipo per i tre siti VR, VC1 e VC2. Il grafico relativo al sito VR evidenzia il tipico andamento riscontrabile in prossimità di strade ad alto flusso di traffico [7], un andamento abbastanza simile, riscalato su valori minori, si riscontra anche per VC2, che risente del traffico locale in maniera più marcata di VC1 (anche per quest'ultimo caso, comunque, vi sono dei picchi presumibilmente connessi agli eventi di partenza da casa e successivo rientro).

Tabella 1: Valori di *LeqD* e *LeqN* per il sito VR (dBA).

	Feriale	Sabato	Festivo
LeqD	72.6	71.9	70.9
LeqN	67.6	68.6	68.7

Tabella 2: Valori di *LeqD* e *LeqN* per il sito VC1 (dBA).

	Feriale	Sabato	Festivo
LeqD	56.5	56.4	58.2
LeqN	51.7	52.9	52.0

Tabella 3: Valori di *LeqD* e *LeqN* per il sito VC2 (dBA).

	Feriale	Sabato	Festivo
LeqD	58.8	58.1	57.5
LeqN	55.2	54.3	55.2

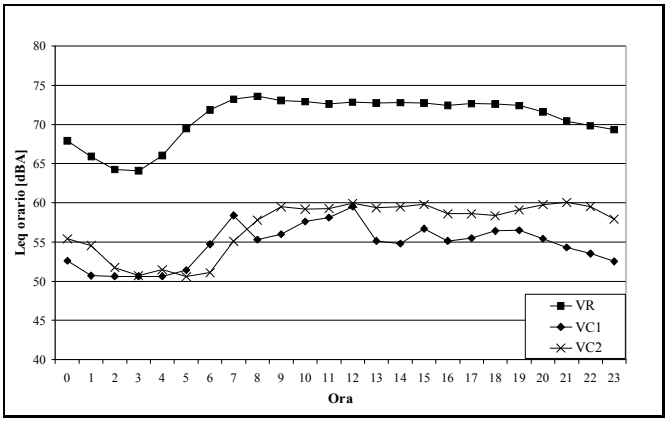


Figura 3: Leq orario per il giorno feriale tipo (dBA).

In Figura 4 si riporta invece, quale esempio, il sonogramma del 99 – esimo percentile di banda per alcuni dei giorni monitorati presso il sito VC2 (ponderazione lineare, dB): è evidente il vantaggio del monitoraggio in banda di frequenza per evidenziare fenomeni persistenti e quasi stazionari con alcune frequenze ben caratterizzate.

L'analisi sui valori dei percentili di banda *L99* in orario notturno (campioni con e senza navi), già descritta metodologicamente, ha evidenziato difformità evidenti nei due periodi febbraio – marzo e aprile – maggio: nel secondo periodo, infatti, erano attive in zona sorgenti acustiche non precisamente identificate che fornivano contributi nella regione delle basse frequenze tali da rendere non possibile discriminare con una sufficiente accuratezza l'eventuale contributo sonoro dovuto alle navi presenti in porto. Viceversa, l'analisi dei dati di *L99* notturno nel periodo febbraio – marzo ha fornito indicazioni interessanti di seguito concisamente riportate.

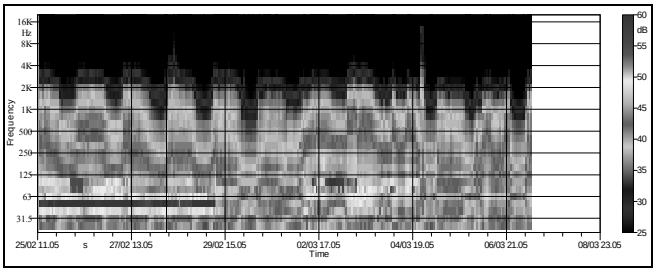


Figura 4: Sito VC2: sonogramma del 99-percentile orario di banda (ponderazione lineare, dB).

In Figura 5 si riportano graficamente i valori di spettro medio aritmetico (e deviazione standard) per la serie di dati di *L99* di banda (ore notturne) in presenza ed assenza di navi all'ormeggio (ponderazione lineare, dB). A livello quali-quantitativo, si verifica che nel caso di presenza di navi all'ormeggio lo spettro medio risulta tendenzialmente maggiore, con l'effetto più vistoso alle basse frequenze (40 ÷ 160 Hz) ed in modo sensibile per alcune bande di frequenza nella parte media dello spettro.

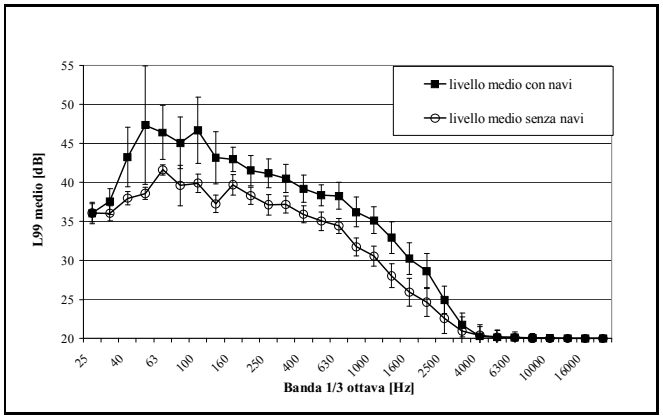


Figura 5: Sito VC2: Spettri medi e deviazioni standard per *L99* di banda notturno, dati del periodo febbraio-marzo (dB).

La ricerca delle bande statisticamente più significative, effettuata con le modalità descritte, ha portato ad individuare le bande 1/3 ottava di 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz, 100 Hz, 125 Hz e 1000 Hz come significative (con differenziali fra livello medio con e senza navi di *L99* dell'ordine di 5 ÷ 9 dB a seconda dei casi), abbastanza significative sono risultate le bande di frequenza a 80 Hz, 630 Hz, 800 Hz e 1250 Hz (differenziale dell'ordine di 4 ÷ 5 dB).

Per le bande di frequenza significative, inoltre, in assenza di navi la deviazione standard risulta nettamente inferiore (0.7 ÷ 1.3 dB) rispetto al caso con navi (1.7 ÷ 7.6 dB): una ulteriore testimonianza della variabilità delle immissioni sonore di orgine portuale dovuta sia alle caratteristiche emissive disomogenee delle singole navi, sia alla variabilità del numero di navi presenti.

In Figura 6 e 7 si riportano, come esempio, i grafici delle distribuzioni statistiche dei livelli monitorati di *L99* per una banda risultata significativa e per una non significativa.

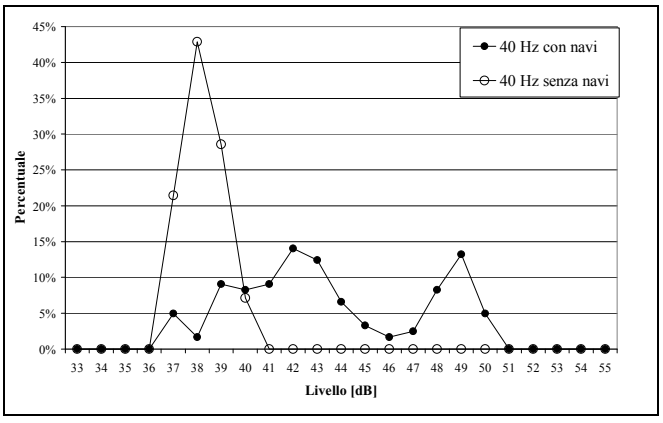


Figura 6: Distribuzioni statistiche del 99-esimo percentile per la banda di frequenza 1/3 di ottava a 40 Hz nei due casi di presenza ed assenza di navi in porto. Campione di dati notturni nei mesi di febbraio e marzo 2008 (percentuale di "significatività" 76%).

In termini di livelli globali ponderati A, il monitoraggio nel sito VC2 ha fornito valori di *L99* orario medio (ore notturne) con presenza ed assenza di navi ormeggiate (sempre per il periodo febbraio – marzo) rispettivamente pari a 46.4 dBA (deviazione standard 1.7 dBA) e 42.1 dBA (deviazione standard 1.1 dBA). In Figura 8 si riportano i grafici delle distribuzioni statistiche dei livelli *L99* orario nelle ore notturne (globale e ponderato A) nei casi di presenza ed assenza di navi ormeggiate in porto.

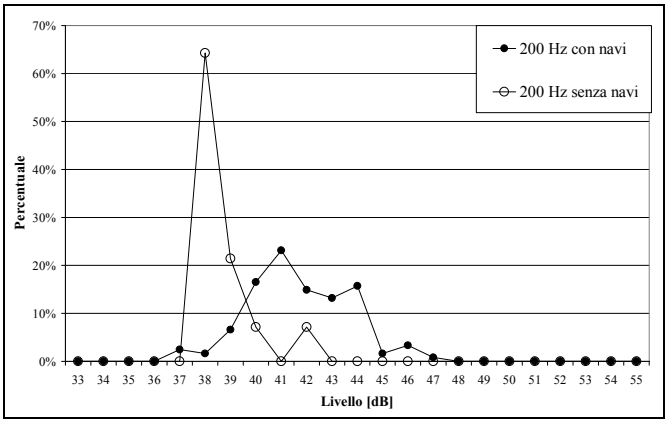


Figura 7: Distribuzioni statistiche del 99-esimo percentile per la banda di frequenza 1/3 di ottava a 200 Hz nei due casi di presenza ed assenza di navi in porto. Campione di dati notturni nei mesi di febbraio e marzo 2008 (percentuale di "significatività" 35%).

Come esemplificato, ad esempio, dal sonogramma del *Leq* su 1s (ponderazione lineare, dB) di Figura 9, rilevato in orario notturno presso il sito S1, si può affermare che anche i rilievi su tempo breve confermano, in termini di microscala temporale, che in presenza di immissioni di origine portuale risultano particolarmente significative alcune bande alle basse frequenze (dove è evidenziata la stazionarietà del fenomeno), sebbene vi siano ragionevolmente contributi anche in altre zone dello spettro, però più difficilmente discriminabili.

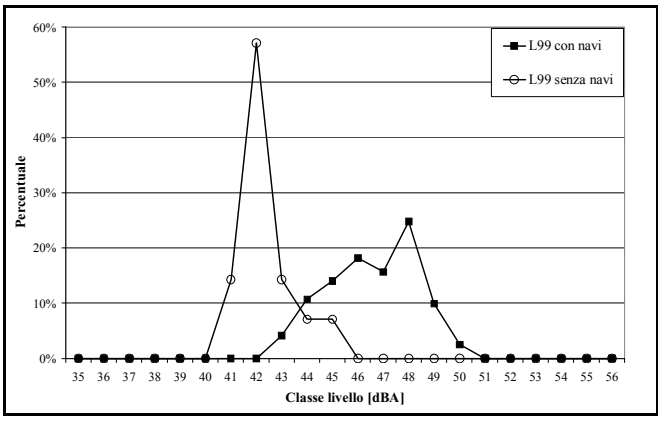


Figura 8: Distribuzioni statistiche di *L99* nei due casi di presenza ed assenza di navi in porto. Campione di dati notturni nei mesi di febbraio e marzo 2008.

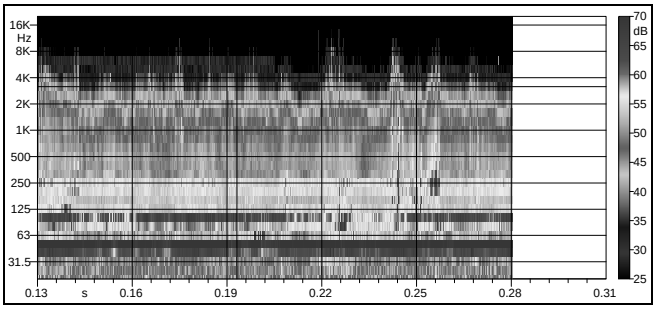


Figura 9: Sito S1: sonogramma del *Leq* su 1s in orario notturno (ponderazione lineare, dB).

Nei siti di misura su tempo breve S1, S2 e S3, inoltre, sono state effettuate misure nella stessa notte, con piccolo scarto di

tempo, con presenza di navi in porto. In termini di *Leq* ponderato A tale sessione notturna ha fornito i seguenti valori: 58.9 dBA (S1), 55.5 dBA (S2) e 55.5 dBA (S3). Il valore più elevato corrisponde al sito S1, più prossimo all'infrastruttura portuale e meno schermato degli altri rispetto all'Aurelia che presentava comunque, anche se piuttosto scarso, un minimo traffico. I livelli rilevati nei siti S2 e S3 sono del tutto compatibili con il valore di *LeqN* medio per la cabina VC2 (Tabella 3).

Terminal Traghetti

I rilievi su tempo breve (orario mattutino) effettuati nei tre siti P1 (il più significativo in relazione al Terminal Traghetti), P2 e P3 hanno fornito, rispettivamente, valori di *Leq* pari a 66.5, 63.1 e 66.4 dBA e valori di *L99* (più utile per caratterizzare la sorgente stazionaria "nave all'ormeggio") pari a 61.6, 57.9 e 57.5 dBA.

La Figura 10 mostra l'evoluzione temporale dei livelli *Leq* su 0.125 s e del livello equivalente progressivo (punto di misura P1); il grafico evidenzia un livello di fondo attestato fra 60 e 65 dBA e la presenza di alcuni picchi dovuti, essenzialmente, al traffico veicolare in area portuale.

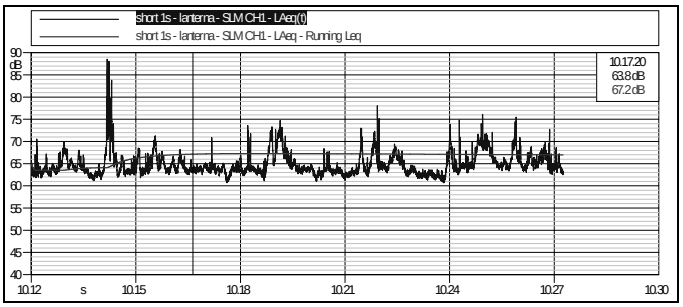


Figura 10: Sito P1: evoluzione temporale del *Leq* su 0.125 s e del *Leq* progressivo (dBA).

Il successivo grafico (Figura 11) rappresenta in forma di sonogramma il multispettro del *Leq* su 1s (P1). Sono evidenti componenti stazionarie di rumore alle basse frequenze riconducibili alle emissioni sonore da parte delle navi (traghetti) all'ormeggio con motori accessi.

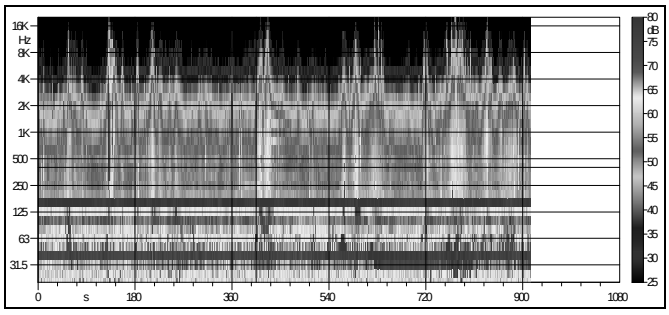


Figura 11: Sito P1: sonogramma del *Leq* su 1s (ponderazione lineare, dB).

PROSPETTIVE

Le rilevazioni fonometriche eseguite hanno confermato che, per il monitoraggio delle immissioni di origine portuale, la misura del *Leq* globale ponderato A non è in genere sufficiente e necessita di essere integrata da analisi statistiche con determinazione di livelli percentili (*Ln*) e da rilievi di multispettro per l'analisi della composizione in frequenza del rumore.

E' intenzione della Provincia di Genova, nel corso del 2010 e degli anni successivi, approfondire lo studio già svolto estendendolo ad altre importanti infrastrutture portuali del porto di Genova ed anche, per confronto, ad infrastrutture minori presenti in altri comuni dell'arco costiero.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. A. Di Bella, A. Tombolato, S. Cordeddu, M. Barbieri, M. Citron, N. Torricella e E. Zanotto, Caratterizzazione in situ e mappatura acustica di navi all'ormeggio nel porto di Venezia, Atti 35° Convegno Nazionale AIA, 2008.
2. A. Papa, D. Rabuazzo, R. Mariconte e G. Bignardi, Rumore portuale: studio previsionale dell'inquinamento acustico ambientale prodotto da navi cisterna destinate al rifornimento idrico pubblico, Atti 35° Convegno Nazionale AIA, 2008.
3. A. Sansone Santamaria, A. Marchese e V. Zappia, Sorgenti di rumore in acque territoriali: problematiche normative e tecniche. Il caso studio di Lipari, Atti 4° Convegno Nazionale "Controllo ambientale degli agenti fisici: nuove prospettive e problematiche emergenti", 2009.
4. G. Moro, A. Drago, R. Carcassi, W. Piromalli, A. Conte, F. Stragapede, M. Morelli, G. Peiretti e G. Canepa, Avvisatori acustici di gru in area operativa portuale: problematiche di applicazione della normativa, Atti 27° Convegno Nazionale AIA – Associazione Italiana di Acustica, pagg. 307-311, 1999.
5. A. Cerniglia, 4-DENA: un nuovo potente mezzo di indagine acustica, *L'Ambiente*, anno IV n. 3, pagg. 28-29, 1997.
6. A. Cerniglia, Individuazione di sorgenti di rumore in un clima acustico complesso: un caso reale, *Antinquinamento*, Anno V N.1, pagg. 46-49, 1998.
7. A. Conte e M. Balzano, Confronto sistematico fra livelli acustici di lungo periodo in diversi contesti antropizzati, Atti 7° Convegno Nazionale CIRIAF – Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici, pagg. 169-174, 2007.

NOMENCLATURA

Leq	livello continuo equivalente (dB o dBA)
LeqD	*Leq* nel periodo diurno 6 ÷ 22 (dBA)
LeqN	*Leq* nel periodo notturno 22 ÷ 6 (dBA)
Ln	livello n-esimo percentile di banda oppure globale (dB o dBA)

INTRODUZIONE E PRIME VALIDAZIONI DI UN NUOVO METODO DI VALUTAZIONE DEL DISTURBO DA RUMORE

Alfredo Badagliacca, Massimo Coppi e Andrea Venditti

Dipartimento di Fisica Tecnica, Facoltà di Ingegneria, Università di Roma "Sapienza"
Via Eudossiana n° 18, Roma

SOMMARIO

Com'è noto uno dei problemi di più rilevante impatto sociale è il rapporto uomo-ambiente in relazione ai disturbi da rumore, tanto in ordine all'impatto immediato che all'esposizione nel tempo. In atto il problema viene affrontato dal punto di vista dell'equivalenza degli effetti sull'uomo, in considerazione della difficoltà derivante dalla non validità del principio di sovrapposizione degli effetti e della differente risposta dell'uomo alle differenti componenti tonali.

Una teoria di recente pubblicata in letteratura affronta il problema della sinergia di differenti stimoli oggettivi pervenendo ad una condizione analitica di esistenza del benessere prendendone in considerazione tutte le tipologie grazie ad un'opportuna trasformazione di coordinate.

Il presente lavoro affronta il problema del disturbo da rumore prendendo in considerazione tutte le componenti tonali secondo quanto previsto da questa teoria e validando sperimentalmente i risultati in rapporto a quanto attualmente previsto tanto dalla letteratura che dalla normativa. L'obiettivo della ricerca è il superamento del ricorso alle equivalenze degli effetti grazie all'introduzione di condizioni analitiche razionalmente legate alla qualità degli stimoli.

DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

Il concetto di disturbo va inquadrato nel contesto generale dei rapporti interattivi tra uomo e ambiente.

Com'è noto [1], questi rapporti prevedono che le interazioni funzionali, cioè quelle che richiedono all'uomo azioni compensatrici rispetto alle sollecitazioni che provengono dall'ambiente, possono suddividersi in due categorie:

- *azioni involontarie*, ovvero quelle azioni di adattamento a variazioni delle grandezze dell'ambiente entro un intervallo che non produce l'insorgere di sensazioni fastidiose. Esse non sono in genere il risultato di una scelta ragionata, finalizzata ad una qualche protezione, e pertanto possono essere anche definite azioni incoscienti. Questo tipo di azione si affianca a quelle necessarie alla interazione attiva in corso: per fissare le idee, se si sta leggendo e si varia l'esposizione del piano di lettura per meglio focalizzare lo scritto, questo tipo di azione non è d'ascrivere a quelle di protezione, in quanto dettata non da preservazione, ma dalla necessità di conseguire un obiettivo nell'ambito di un'interazione attiva.
- *azioni volontarie*, ovvero quelle azioni di protezione che discendono da una scelta ragionata e sono finalizzate alla compensazione di variazioni delle grandezze ambientali in grado di determinare sensazioni di disturbo, di fastidio o, peggio, di dolore. Esse pertanto possono essere anche definite azioni coscienti.

Il sottoinsieme dell'insieme dei valori di ogni grandezza ambientale sollecitatrice per il quale non occorre che l'uomo metta in opera alcuna azione per la sua protezione, definisce un intervallo di valori fra un minimo ed un massimo, che prende il nome di *intervallo di tolleranza biologica*.

Quando l'ambiente sollecita l'uomo con più grandezze, magari differenti tra loro per natura, ai fini della valutazione degli effetti sinergici sull'uomo, si cozza contro la difficoltà che discende dalla non applicabilità del principio di sovrapposizione degli effetti in materia di sensazioni indotte.

Un caso emblematico di questa situazione si ha nel caso dei suoni complessi che non ricadono fra quelli che consentono intelligibilità da parte dell'uomo, e che pertanto risiedono nell'insieme dei suoni non desiderati e quindi negli aspetti connessi alla valutazione del disturbo.

L'audiogramma normale si presta benissimo ad evidenziare gli intervalli di tolleranza biologica relativi ad ogni singola sollecitazione tonale, evidenziando per ognuna di esse la soglia di udibilità e le soglie del fastidio e del dolore. Il problema nasce nel momento in cui si è in presenza di un complesso di sollecitazioni sonore, magari in presenza di una qualche componente che prevale sulle altre.

Come procedere ad una valutazione razionale e, possibilmente, oggettiva? In atto gli strumenti adottati si basano su correlazioni euristiche che tendono ad una valutazione basata sull'equivalenza di una qualche proprietà: energia associata alle sollecitazioni, ponderazione del disturbo soggettivo percepito, etc..

Il presente lavoro si prefigge di pervenire ad una valutazione del rumore basandosi su una procedura analitica razionalmente oggettiva che euristicamente prende i soli risultati degli estremi degli intervalli di tolleranza biologica, ed utilizzando la scala dei *bonum* (simbolo: **B**)[2].

DESCRITTORI ACUSTICI PRESI A CONFRONTO

Livello Equivalente Continuo

Nella tecnica acustica è ormai da tempo consolidato l'impiego del livello di pressione sonora ponderato in curva A

come indice di valutazione del disturbo per i rumori a larga banda. Considerando poi che il disturbo indotto sul soggetto è determinato non solo dall'entità dello stimolo sonoro, ma anche dalla "dose" di rumore acquisita, l'impiego del livello equivalente continuo ben rappresenta la circostanza che è l'energia acquisita durante il tempo di esposizione a determinare l'effettivo disturbo. Per tener conto poi, del maggior disturbo indotto dalla presenza di particolarità nel rumore disturbante (componenti tonali, caratteristiche impulsive), vengono introdotti dei coefficienti correttivi da sommare al livello equivalente misurato, ottenendo il cosiddetto livello corretto, oggetto finale della valutazione.

Curve NR (Noise Rating Curves)

Il criterio delle curve NR deriva dai procedimenti fondati sull'impiego di un sistema di curve di valutazione che attribuiscono un diverso peso alle varie bande parziali di ottava e sull'ipotesi che il disturbo globalmente causato dal rumore possa essere ricondotto a quello dovuto allo sola banda più disturbante.

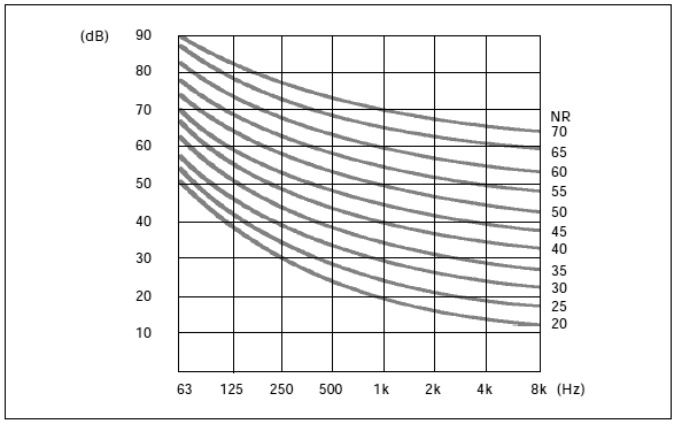


Figura 1 – Curve NR

Tabella 1 – Valori NR per diverse destinazioni d'uso

Ambiente	NR	dB(A)
Studi radio televisivi	20	30
Teatri e sale da concerto	20 - 25	30 - 35
Auditorium e chiese	25 - 30	35 - 40
Sale cinematografiche	25 - 30	35 - 40
Ospedali e sale operatorie	30 - 40	40 - 50
Camere da letto	25 - 35	35 - 45
Biblioteche	30 - 35	40 - 45
Uffici	35 - 45	45 - 55
Ristoranti e bar	35 - 45	45 - 55
Piscine	35 - 50	45 - 60
Industrie leggere	50 - 70	60 - 80

Il sistema di curve adottato è quello riportato nella figura 1. La banda di riferimento è quella centrata sulla frequenza di 1.000 Hz.

Per determinare l'indice NR si riporta sul grafico di figura 1 lo spettro del rumore da analizzare. Come indice di valutazione NR si assume il numero che compete alla più bassa curva che non è superata dal livello di rumore in alcuna banda di ottava.

Questo criterio di valutazione è completato da tabelle che forniscono i valori di NR da considerare tollerabili in diversi tipi di ambiente (Tabella 1).

I LIMITI SANITARI

Il limite sanitario ritenuto comunemente dalla letteratura il limite fisiologico al di sopra del quale si entra nel campo del danno alla salute è pari a 70 dBA.

Recentemente l'O.M.S. (Organizzazione Mondiale della Sanità o World Health Organization, WHO) ha fissato dei limiti sanitari più restrittivi per il periodo diurno e il periodo notturno. In particolare, per evitare danni alla salute e disturbi del sonno, i limiti diurni e notturni sono rispettivamente 65 dBA e 55 dBA.

La stessa O.M.S. individua i livelli tipici relativi alle varie attività e i corrispondenti effetti sulla salute [12].

L'INDICE PROPOSTO

Generalità

Com'è noto, per indice ambientale s'intende una proprietà macroscopica del sistema ambiente, avente carattere intensivo, atta ad individuarne il comportamento nell'interazione con l'uomo. Consegue, pertanto, che esso può dirsi veramente rappresentativo dello stato dell'ambiente se in una qualche misura tiene conto globalmente della sinergia di tutti gli elementi che concorrono a definirne il comportamento nei confronti dell'uomo. La qualità dell'interazione determina l'appellativo dell'indice. Peraltro, nella sua determinazione, va tenuto presente che il rapporto uomo-ambiente implica che le osservazioni vanno condotte in relazione non solo alle sensazioni, ma anche alle fisiopatologie che vengono indotte sull'uomo [3].

Queste considerazioni implicano che operativamente le sollecitazioni vanno suddivise in due classi:

a) quelle che sono in grado di generare malessere;
b) quelle che sono tollerate, all'interno delle quali si può individuare un sottoinsieme atto a dar luogo a interazioni in grado di suscitare sensazioni di benessere.

Il nostro indice deve pertanto dare risposta esaustiva tanto ad individuare se le sollecitazioni ricadono fra quelle che danno malessere, che a dare una metrica opportuna ad informare su quanto si è distanti da tale stato non desiderato.

Definizione

Nel caso delle sollecitazioni acustiche, cui è focalizzata la nostra attenzione nel presente lavoro, si verifica che per ogni sollecitazione monotonale si conosce l'intervallo di tolleranza biologica, per il qual caso è quindi facile trovare la risposta al quesito precedente. Il problema si verifica quando la sollecitazione è data dal coacervo di un insieme di sollecitazioni monotonali, nel qual caso la valutazione si è storicamente determinata sulla base di valutazioni induttive.

A livello implicito si può scrivere [1]

$$T = f(s_1, s_2, \ldots, s_n) \qquad (1)$$

in cui T è la *tensione acustica* generata sull'uomo ed s_i denota la generica sollecitazione tonale. In atto non è dato determinare la natura esplicita di tale funzione, di essa si può solo affermarne l'esistenza a livello qualitativo.

Al riguardo, però, si può affermare che per ogni insieme di valori delle n sollecitazioni, è possibile esprimere un giudizio di sussistenza o no di malessere o di tolleranza, non solo, ma anche di esprimere giudizi di comparazione (poco fastidio –

molto fastidio, armonia-cacofonia, etc.).

La (1) può essere quindi espressa in forma logica dalla relazione seguente

$$\mathbf{S} \xrightarrow{\mathcal{G}} \mathbf{T} \qquad (2)$$

in cui "$\xrightarrow{\mathcal{G}}$" esprime il legame di corrispondenza univoca, **S** il dominio e **T** il codominio.

Le implicazioni sono che, è possibile ordinare l'insieme dei giudizi espressi per classe di comparazione, pervenendo ad una scala di misura instaurando una corrispondenza biunivoca di essi con l'insieme dei numeri reali. Com'è noto il grado di tale scala è il *bonum* [2].

Se, relativamente all'i-esima componente tonale, $s_{i,lt}$ è il valore di soglia inferiore dell'intervallo di tolleranza biologica (nel nostro caso quello relativo alla soglia di udibilità), $s_{i,ut}$ il valore di soglia superiore dell'intervallo di tolleranza biologica (nel nostro caso quello relativo alla soglia di fastidio) ed s_i il valore corrente, ricorriamo alle variabili ridotte

$$\sigma_i = \frac{s_i - s_{i,lt}}{s_{i,ut} - s_{i,lt}} \qquad (3)$$

con

$$s_{i,lt} \le s_i \le s_{i,ut} \qquad \forall i$$

ed applichiamo la trasformazione di coordinate alla (1), questa viene espressa nella forma

$$\tau = \varphi(\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_n) \qquad (4)$$

τ risulta definita nell'iperspazio $\Re^n$, omogeneo perché tutti gli assi hanno la stessa natura, e quindi euclideo, e rappresenta la traiettoria dell'interazione. La distanza di ogni punto di essa dal centro degli assi di riferimento è indicativa della misura della sinergia delle sollecitazioni. Sicché la regione che dà luogo ad interazioni in grado di generare malessere è quella in cui i punti hanno distanza ≥ 1 dal centro di riferimento, il quale corrisponde alla condizione di soglia di udibilità.

In sostanza il vettore

$$\vec{b} = \vec{\sigma_1} + \vec{\sigma_2} + \ldots\ldots + \vec{\sigma_n} \qquad (5)$$

individua lo stato corrente dell'ambiente nell'interazione. Tale vettore denota il componente del vettore benessere, rappresentativo del sottospazio $\Re_a$ corrispondente alle interazioni acustiche, per cui assume il nome di "vettore benessere acustico".

Sicché il modulo di $\vec{b}$ espresso in percentuale rispetto all'intervallo di tolleranza biologica

$$b_a = 100 \cdot \left|\vec{b}\right| = 100\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \ldots + \sigma_n^2} \qquad (6)$$

può essere assunto ad indice della capacità dell'ambiente di indurre sensazione sonora desiderata o meno, tanto nel caso di sollecitazione tonale singola che nel caso di suoni a spettro complesso.

Poiché $\vec{\sigma}_i$ è l'i-esimo componente di $\vec{b}$, consegue che il coseno direttore

$$m_i = \frac{\left|\vec{\sigma}_i\right|}{\left|\vec{b}\right|} \qquad (7)$$

denota la sensibilità dell'interazione rispetto all'i-esima componente tonale del suono.

Natura delle sollecitazioni

Un accenno è necessario relativamente alla natura delle sollecitazioni che l'ambiente induce sull'uomo.

L'audiogramma normale esprime le sensazioni in termini di phon. Nel nostro caso, ai fini della (3), per la misura di *s* non possiamo far riferimento a misure che esprimono una elaborazione soggettiva della sollecitazione, ma ai valori oggettivi che sono dati o dall'intensità sonora o dalla pressione sonora.

I valori soggettivi dell'audiogramma si utilizzano per il giudizio comparativo tra le sensazioni (l'insieme delle isofoniche).

VALIDAZIONE

Le operazioni di validazione del modello si basano sulla seguente procedura: si applicano a un numero ovviamente limitato, ma significativo, di spettri di rumore le procedure precedentemente illustrate e si confrontano i risultati con quanto si deduce dall'applicazione del modello.

Gli spettri presi a campione della sollecitazione sono elencati in Tabella 2, mentre sono rappresentati graficamente in Tabella 3.

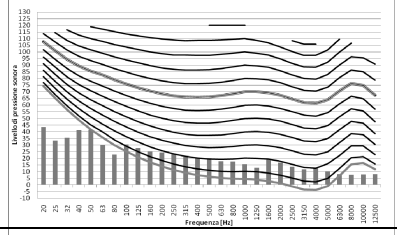
Tabella 2 – Tipologia di rumore preso a campione

TIPOLOGIA RUMORE	IDENTIFICATIVO	TIPOLOGIA RUMORE	IDENTIFICATIVO
Residuo FC	01	Ambientale FA	11
Residuo FA	02	Rumore aeroportuale	12
Ambientale FC	03	Ambientale FA	13
Ambientale FC	04	Rumore aeroportuale	14
Ambientale FC	05	Ambientale FA	15
Rumore aeroportuale	06	Rumore aeroportuale	16
Rumore aeroportuale	07	Ambientale FA	17
Rumore aeroportuale	08	Ambientale FA	18
Rumore aeroportuale	09	Rumore aeroportuale	19
Rumore aeroportuale	10	Rumore aeroportuale	20

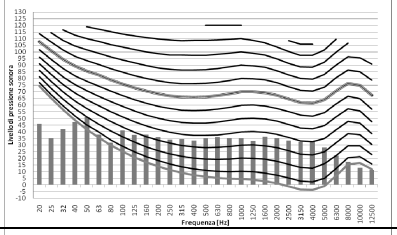
Considerando che, in letteratura il livello di 70 dBA è ritenuto comunemente il limite fisiologico al di sopra del quale si entra nel campo del danno alla salute, si è assunto, cautelativamente, il limite superiore di tolleranza biologica, per ogni banda di frequenza, il valore assunto in corrispondenza della isofonica a 70 phon.

Tabella 3 – Spettri dei rumori presi in considerazione

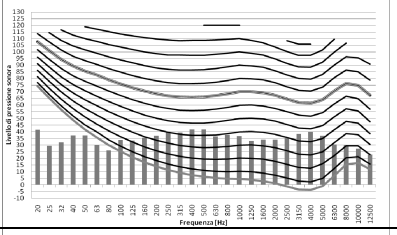
Rumore 01



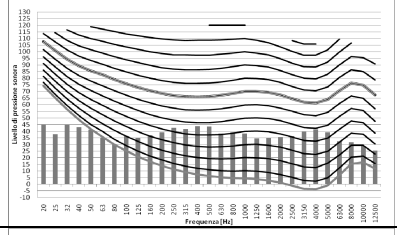
Rumore 02



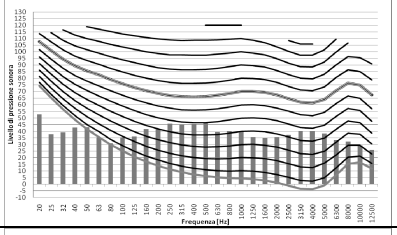
Rumore 03



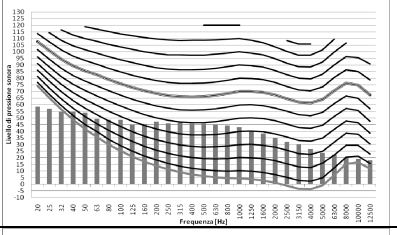
Rumore 04



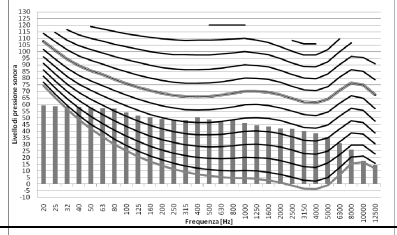
Rumore 05



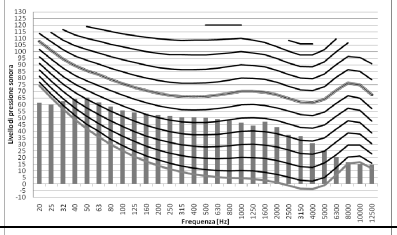
Rumore 06



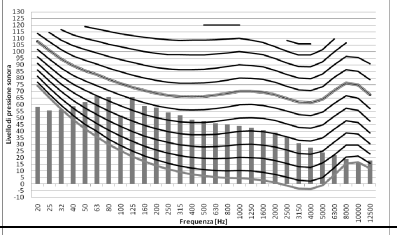
Rumore 07



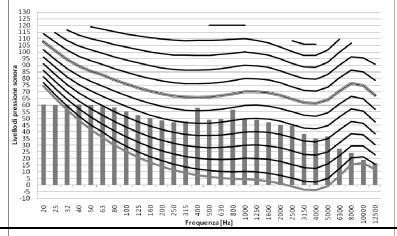
Rumore 08



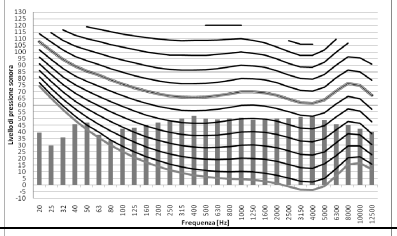
Rumore 09



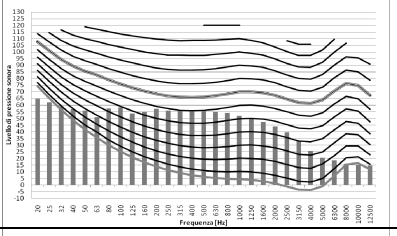
Rumore 10



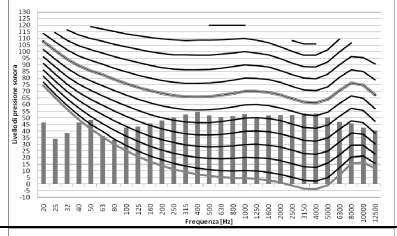
Rumore 11



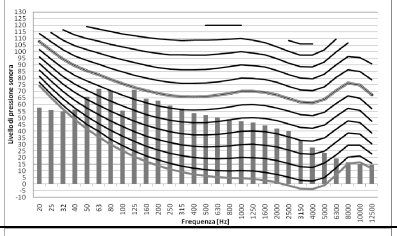
Rumore 12



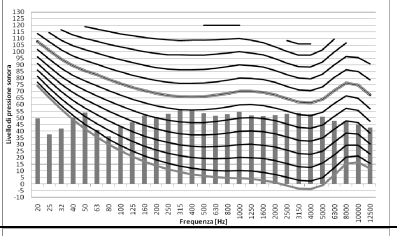
Rumore 13



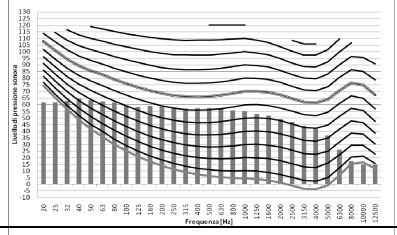
Rumore 14



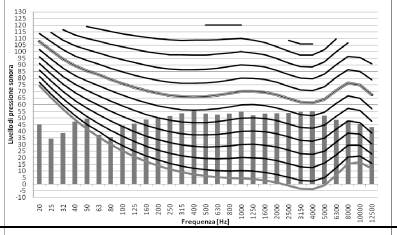
Rumore 15



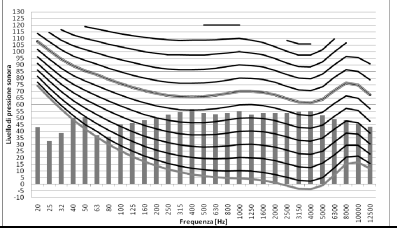
Rumore 16



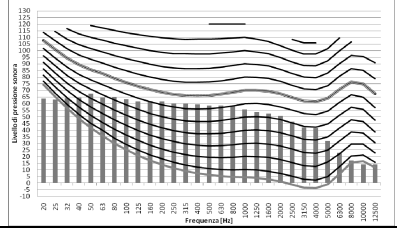
Rumore 17



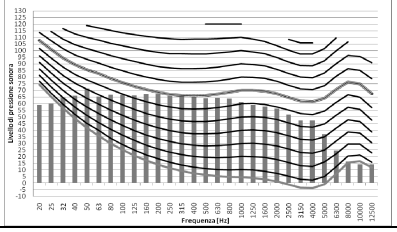
Rumore 18



Rumore 19



Rumore 20



Come stimolo caratteristico dell'ambiente è assunta la pressione acustica.

I valori desunti dall'applicazione del modello si esprimono in bonum (B).

Confronto con i descrittori acustici

In questo paragrafo si riportano i grafici con le correlazioni tra i descrittori presi a confronto ed il modulo del vettore benessere.

Tabella 4 – Quadro riepilogativo dei confronti

Identificativo Rumore	L_{Aeq} [dBA]	NR	*b* [B]
01	28,1	25	1,33
02	45,2	44	10,03
03	48,5	49	17,35
04	50,2	50	21,48
05	50,9	50	24,72
06	52,8	50	27,97
07	56,8	53	44,58
08	57,7	53	56,79
09	58,6+6*	55	94,58
10	61,3	58	65,38
11	61,5	60	68,01
12	62,3	59	85,04
13	63,4	61	85,64
14	63,5+6*	60	174,33
15	64,2	62	95,60
16	64,7	60	111,97
17	64,9	64	100,00
18	65,2	64	104,40
19	66,4	62	146,33
20	71,9	68	267,42

* presenza di componente tonale a bassa frequenza

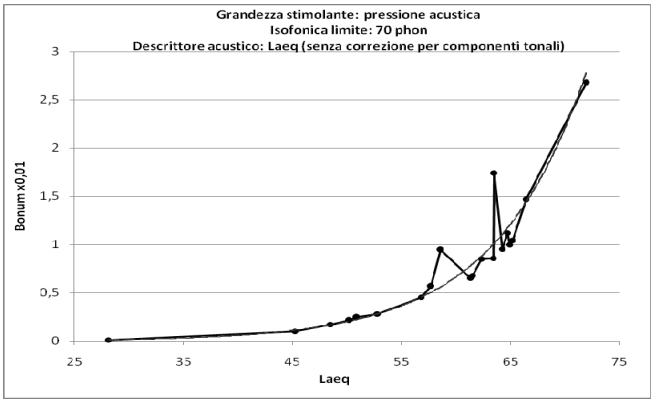


Figura 2 – Correlazione tra L_{Aeq} senza correzione per componenti tonali e bonum

Come confronto si sono assunti i seguenti indici di valutazione: Livello Equivalente ponderato "A"; Curve NR. Per quanto attiene l'L_{Aeq} si sono confrontati i valori di *b* con i valori dell'indice sia senza tener conto della correzione per la presenza di componenti tonali (grafico di Fig. 2) sia con la correzione suddetta (grafico di Fig. 3). La Tabella 4 riporta i risultati del confronto.

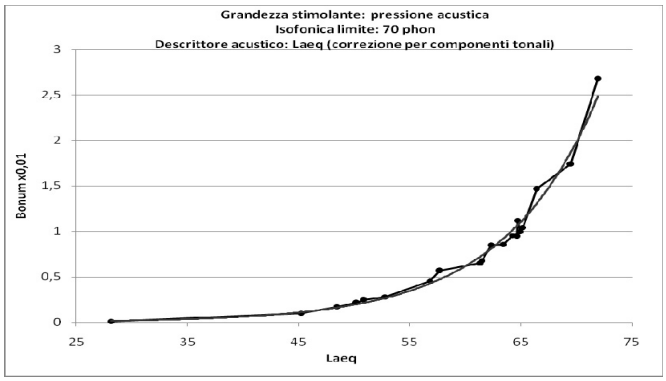


Figura 3 – Correlazione tra L_{Aeq} con correzione per componenti tonali e bonum

Dai grafici di figura 2 e 3, si può notare una buona correlazione tra i due indici (Bonum e L_{Aeq}). La funzione di interpolazione risulta di tipo esponenziale. In particolare si può notare che, nel caso in cui all'L_{Aeq} viene applicata la correzione per la presenza di componenti tonali a bassa frequenza (rumori 9 e 14 di tabella 3) come previsto dalla normativa (+ 6 dBA), la curva di interpolazione esponenziale presenta un più alto indice di correlazione.

Anche nel caso dell'indice NR, la correlazione con il Bonum è del tipo esponenziale, ma, in questo caso, si verificano delle discontinuità più marcate in corrispondenza degli spettri che presentano componenti tonali (figura 4)

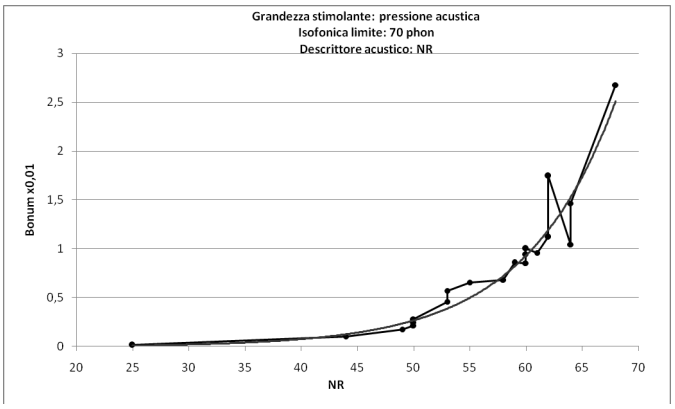


Figura 4 – Correlazione tra NR e bonum

Dall'analisi delle figure 2 e 3, si può osservare che, per valori di L_{Aeq} > 55 dBA l'indice B denuncia una maggiore sensibilità all'aumento del livello globale (sia esso reale o fittiziamente aumentato per la presenza di componenti tonali). Tale circostanza sembra rispecchiare l'andamento della risposta soggettiva al disturbo per alti livelli di rumore ambientale.

Il nuovo indice proposto appare quindi sensibile sia al livello globale sia alle caratteristiche spettrali del rumore (componenti tonali). Tale ultima circostanza è evidenziata dall'andamento dei "coseni direttori" in funzione delle bande di frequenza, riportato in figura 5 e riferito allo spettro del rumore 9. Si noti come tale parametro, di facile determinazione, consenta di evidenziare, in ragione della loro

importanza, tutte le singolarità spettrali più significative presenti nello spettro.

Dal grafico di figura 3 si può anche osservare che, al limite di tollerabilità di 100 B previsto dal nuovo indice, corrisponde un livello L_{Aeq} pari a circa 65 dBA e cioè proprio il valore limite diurno recentemente assunto dall'O.M.S. [9].

Va infine notato che, il nuovo indice proposto potrebbe rappresentare anche un indice di sensazione per suoni complessi (come ad esempio la scala dei son di Stevens) con il vantaggio, rispetto agli indici attualmente presenti in letteratura, di una facile e rapida determinazione.

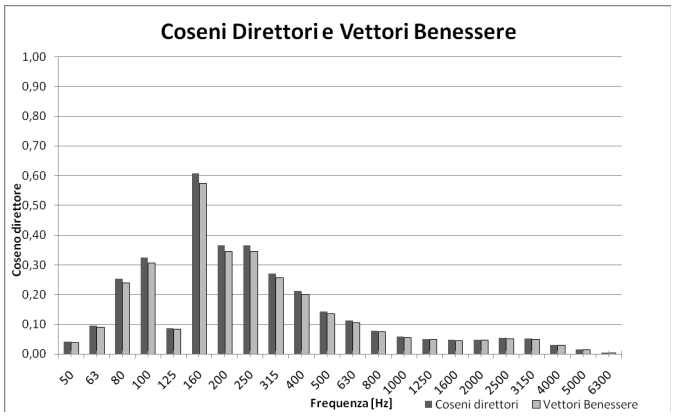


Figura 5 – Coseni direttori e vettori benessere per il rumore con identificativo 09

CONCLUSIONI

Il nuovo indice proposto risulta un'applicazione al campo dell'acustica ambientale, dell'indice di benessere globale introdotto da Badagliacca.

In questa prima fase della ricerca si è effettuata una comparazione con i più comuni indici di sensazione e di valutazione del disturbo. Si è riscontrata una buona correlazione con i suddetti indici che ha evidenziato una significativa sensibilità dell'indice sia con il livello globale sia con le caratteristiche spettrali del rumore.

I risultati della comparazione hanno fatto intravedere la possibilità di proporre il "vettore benessere acustico" anche come indice di sensazione di suoni complessi pure in ragione della sua facile e rapida determinazione.

Una fase successiva della ricerca sarà dedicata alla messa a punto ed alla validazione in campo dell'indice, attraverso la correlazione tra indagini demoscopiche eseguite sul campo con specifiche misure fisiche. In particolare verrà indagata una più estesa variabilità dell'intervallo di tolleranza biologica all'interno dell'audiogramma normale al fine di testare il campo di validità dell'indice.

In conclusione, i risultati del processo di confronto permettono di affermare che l'impianto della teoria del benessere globale di Badagliacca gode del conforto oltre che dell'impostazione teorica anche dei risultati sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

1. Badagliacca A. - *Theoretical approach to the global comfort problem in the manenvironment interactions* – Building & Environment 37, 2002.
2. Badagliacca A. – *"Bonum": the degree of a universal scale for the comfort metric* – Building & Environment 37, 2002.
3. Badagliacca A., Moncada lo Giudice G. - *Approccio ambientale: considerazioni per la scelta di un paradigma* – Condizionamento dell'Aria (sez. Ricerca), pp. 33-42, 1997.
4. Badagliacca A. - *Alba Index for the global evaluation of the air quality* - EETI 2004, Rio de Janeiro 2004.
5. Mario Cosa – Rumore e vibrazioni – Effetti, valutazione e criteri di difesa – Maggioli Editore.
6. Legge 26 Ottobre 1995 n° 447 – Legge quadro sull'inquinamento acustico.
7. D.P.C.M. 14 Novembre 1997 – Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore.
8. D.M. 16 Marzo 1998 – Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico.
9. World Healt Organization Regional Office for Europe – *Technical meeting on exposure-response relationships of noise on health* – 19-21 September 2002 Bonn, Germany.
10. World Healt Organization Regional Office for Europe – *Night noise guidelines (NNGL) for Europe* – 2007.
11. World Healt Organization Regional Office for Europe – *Technical meeting on aircraft noise and healt* – 29-30 October 2001 Bonn, Germany.
12. World Healt Organization Regional – *Guidelines for community noise* – 26-30 April 2001 London, UK.
13. M. Coppi, A. Venditti – *Valutazione del disturbo in ambienti abitativi* – 7-8 Aprile 2006 Perugia, 6° congresso nazionale CIRIAF.

LE VALUTAZIONI DI CLIMA E DI IMPATTO ACUSTICO: STRUMENTI E PROBLEMATICHE CONNESSE

Augusto Papa[1], Raffaele Mariconte[1]

[1] ISPESL Dipartimento Installazioni Di Produzione ed Insediamenti Antropici, Piazza Del Viminale n.14, Roma

SOMMARIO

Le valutazioni di clima e di impatto acustico risultano strumenti essenziali per garantire la crescita e lo sviluppo di un territorio in maniera compatibile con le esigenze di tutela dall'inquinamento acustico sia dell'ambiente che dei cittadini.

Tali valutazioni, se ben affrontate, offrono anche la possibilità di stabilire in fase preliminare, se necessario, tutti gli accorgimenti tecnici da adottare per contenere i livelli sonori entro i limiti di legge e, nella maggioranza dei casi, possono portare ad una significativa riduzione dei costi per la mitigazione della rumorosità nella fase successiva all'intervento.

Attualmente, si tende a fare un largo impiego di modelli informatici in questa tipologia di studi. Tuttavia, è necessario, ai fini di una corretta ed accurata valutazione, possedere una valida padronanza degli strumenti informatici a disposizione, avendo cognizione delle principali problematiche connesse con l'impiego degli stessi.

In questo lavoro verranno analizzate alcune problematiche che si possono incontrare nel trattare le valutazioni di clima ed impatto acustico con i moderni strumenti informatici.

BREVE STORIA DEI MODELLI PER LA PROPAGAZIONE DEL RUMORE IN AMBIENTE ESTERNO

I primi esperimenti sul suono in ambiente esterno hanno riguardato la sua velocità di propagazione. Dal frate francescano Mersenne che, nel XVII secolo indicò il modo per conoscere la velocità del suono (misurare la differenza di tempo tra la luce vista allo sparo di un cannone posto ad una certa distanza e il suono successivamente udito) all'ecclesiastico londinese Derham, che osservò e documentò l'influenza del vento e della temperatura sulla velocità del suono, nonché l'effetto assorbente della neve, successivi esperimenti e osservazioni furono fatti in svariate esperienze belliche (un ruolo importante ebbero le due guerre mondiali). Oggi gli studi sulla propagazione del suono nell'ambiente esterno continuano ad avere una vasta applicazione in campo militare. Nell'ambito civile, il loro impiego riguarda principalmente la modellazione del rumore generato dalle infrastrutture di trasporto terrestre e aereo e da fonti industriali. Da più di un ventennio società, enti di ricerca o università, hanno tradotto in codici di calcolo informatici i diversi algoritmi per la propagazione del suono in ambiente esterno, dapprima per avere un supporto informatico per i loro studi e successivamente introdotti sul mercato come prodotti commerciali a disposizione dei consulenti grazie anche al notevole sviluppo avuto nel settore dell'informatica che ha reso tali codici sempre più potenti e con interfacce utente sempre più "friendly".

I PRINCIPALI ALGORITMI DI CALCOLO PER LA PROPAGAZIONE DEL RUMORE

I principali algoritmi impiegati in tale ambito possono sommariamente essere classificati in funzione del tipo di sorgente di rumore che trattano: rumore industriale, rumore da traffico stradale, rumore da traffico ferroviario e rumore aeroportuale.

L'approccio, a parte quello relativo al rumore aeroportuale, consiste nel modellare acusticamente la sorgente, la conformazione del territorio (modello digitale del terreno), le caratteristiche del mezzo di propagazione (aria), gli ostacoli presenti (barriere, edifici, aree verdi, aree industriali ecc.) e la posizione dei ricettori.

Il calcolo viene generalmente eseguito con tecniche di tracciamento diretto di raggi sonori dalla sorgente ai ricettori (ray tracing) oppure dai ricettori verso la sorgente (inverse ray tracing), o con la tecnica delle sorgenti immagine. Talvolta, tali tecniche vengono impiegate in simbiosi, in cui una può essere usata laddove un'altra risulta meno adeguata.

La modellizzazione acustica del rumore industriale (che può dipendere da molteplici sorgenti come macchinari, impianti, parcheggi, attività artigianali ecc., che spesso coesistono o sono una diretta conseguenza dell'altra), parte dalla conoscenza dei dati di emissione delle singole sorgenti in termini di:

- Potenza sonora globale;
- Spettro di emissione;
- Direttività.

Tali informazioni possono essere ottenute attraverso misure standardizzate su sorgenti reali simili o analoghe a quelle da inserire nel modello (ad esempio, usando le norme serie ISO 3740 – 3747, ISO 9614 -1 e 9614 – 2 o ISO 8297 per impianti multi sorgente, certificazione Eurovent per la potenza sonora degli impianti di climatizzazione ecc.), attraverso misure che impiegano un metodo per "sostituzione" ed utilizzano lo stesso algoritmo di modellazione acustica per risalire ai dati di potenza sonora, attraverso i dati forniti dal costruttore, attraverso dati reperibili da misure di repertorio, oppure usando dati derivanti da relazioni matematiche tratte dalla letteratura tecnico-scientifica a disposizione. Note queste

informazioni, vanno poi considerati tutti quegli effetti relativi alla propagazione in ambiente esterno che si possono riassumere in:

- Divergenza geometrica;
- Assorbimento atmosferico;
- Effetti del terreno;
- Riflessioni da parte delle superfici;
- Effetto degli ostacoli;
- Effetto della vegetazione, siti industriali, edifici.

Nella tabella 1, sono sinteticamente elencati i principali standards generalmente adottati per il rumore industriale.

Tabella 1: iprincipali standards del rumore industriale

Standard	Nazione	Note
ISO 9613	Internazionale	Metodologia ad interim raccomandata dalla comunità europea per il calcolo del rumore industriale per i paesi comunitari non dotati di un proprio modello
DIN 18005	Germania	Norma tedesca che affronta anche problematiche di rumore industriale
VDI 2714/VDI 2720/ VDI 2751	Germania	Norme tedesche che affrontano problematiche di rumore industriale
General Prediction Method	Danimarca	Metodo di calcolo utilizzato dai paesi scandinavi coinvolti nel progetto Nordforsk
BS 5228	UK	Norma anglosassone riferita al rumore di cave e cantieri
HMRI-1996	Paesi Bassi	Norma olandese riferita al rumor e industriale
ÖAL 28	Austria	Norma austriaca
General Prediction Method	Danimarca	Metodo di calcolo utilizzato dai paesi scandinavi coinvolti nel progetto Nordforsk
Concawe	Belgio	Metodo sviluppato per l'industria petrolifera, per la propagazione su lunghe distanze con orografia piatta (terreno o acqua). Il metodo è adatto in condizioni meteo particolari, perché permette di parametrizzare la meteorologia.

Il rumore da traffico stradale è caratterizzato da un'emissione di tipo lineare che dipende dalle caratteristiche dell'infrastruttura e dai veicoli che vi circolano. Per la determinazione dell'emissione sonora, in genere sono richiesti:

- Flusso veicolare orario;
- Tipologia di flusso;
- Percentuale di mezzi pesanti;
- Velocità veicoli leggeri e pesanti;
- Pendenza stradale;
- Tipo di pavimentazione;
- Caratteristiche dell'infrastruttura e del territorio strettamente a contatto con essa.

Per quanto riguarda la propagazione, i parametri da considerare sono sostanzialmente quelli già elencati per il rumore industriale. Nella tabella 2, sono elencati sinteticamente i principali standards adottati per la modellizzazione del rumore da traffico stradale.

La generazione del rumore ferroviario dipende essenzialmente dal tipo di convoglio e dalla velocità di percorrenza. Le principali componenti del rumore sono da attribuire alla trazione ed ai sistemi ausiliari, al contatto ruota - rotaia e a fattori aerodinamici. Ognuna prevale in funzione della velocità (per velocità basse prevale la componente dovuta alla trazione e ai sistemi ausiliari, per velocità intermedie il contatto tra ruota e rotaia, per velocità alte i fattori aerodinamici). In termini di propagazione, un treno può essere assimilato a una sorgente lineare finita che irradia fronti d'onda semicilindrici con una particolare direzionalità.

Tabella 2: principali standards del rumore da traffico stradale

Standard	Nazione	Note
NMPB-Routes 96	Francia	Metodologia ad interim raccomandata dalla comunità europea per il calcolo del rumore da traffico stradale per i paesi comunitari non dotati di un proprio modello
RLS 90/DIN 18005	Germania	Norme tedesche per il calcolo del rumore da traffico stradale (risp. emissione e propagazione)
ÖAL 23	Austria	Norma austriaca il calcolo del rumore da traffico stradale
Metodo dell' EMPA	Svizzera	Metodo di calcolo utilizzato in Svizzera, sviluppato dai laboratori federali di ricerca e test dei materiali
Statens Planverk 48	Scandinavia	Metodo di calcolo utilizzato in Scandinavia
CoRTN, Calculation or Road Traffic Noise	UK	Standard anglosassone per il calcolo del rumore da traffico stradale
FHWA, Federal Highway Model	USA	Modello americano, uno dei più antichi modelli per il calcolo del rumore da traffico stradale
Modello della Società di Acustica giapponese	Giappone	Modello giapponese per il calcolo del rumore da traffico stradale

Per la determinazione dell'emissione sonora, in genere sono richiesti i seguenti dati di input:

- Numero di passaggi per periodo di riferimento;
- Tiplogia di treno;
- Numero di convogli;
- Caratteristiche dell'armamento;
- Curvatura del tratto ferroviario;
- Caratteristiche dell'infrastruttura e del territorio strettamente a contatto con essa.

Nella tabella 3, sono elencati sinteticamente i principali standards adottati nel rumore da traffico ferroviario.

Tabella 3: principali standards del rumore da traffico ferroviario

Standard	Nazione	Note
RMR	Olanda	Metodologia ad interim suggerita dalla comunità europea per il calcolo del rumore da traffico ferroviario per i paesi comunitari non dotati di un proprio modello
Schall 03/DIN 18005	Germania	Norme tedesche per il calcolo del rumore da traffico ferroviario (risp. emissione e propagazione)
ÖAL 30	Austria	Norma austriaca il calcolo del rumore da traffico ferroviario
Kilde Report 130; Noise from Railway Traffic Railway Traffic Noise 1996:524	Scandinavia	Metodi di calcolo utilizzati in Scandinavia
Calculation of Railway Traffic Noise (CRN)	UK	Standard anglosassone per il calcolo del rumore da traffico ferroviario
Narrow-Gauge Railways	Giappone	Modello giapponese per il calcolo del rumore da traffico ferroviario

I modelli per la valutazione del rumore aeroportuale sono basati o su tecniche di simulazione, (descrivono dettagliatamente le caratteristiche del rumore delle sorgenti, tenendo in conto anche tutti gli effetti legati alla propagazione, ma richiedono un'elevata capacità di calcolo con conseguente dispendio di tempo) oppure su tecniche di segmentazione, (non simulano la propagazione del suono ed hanno una rappresentazione semplice delle sorgenti, attraverso delle curve di potenza sonora in funzione della distanza). Queste tecniche di segmentazione sono spesso implementate nei software commerciali. L'impatto acustico si valuta conoscendo la situazione di traffico sul territorio in funzione della variazione di vari parametri. I modelli sono adatti a stimare effetti medi su tempi lunghi usando dati di input determinati su medie statistiche annuali.

I principali dati di input richiesti in questo caso sono:

- Curve NPD (Noise-Power-Distance) e Performance Data;
- Caratteristiche del velivolo;
- Tipo di operazione di volo (decolli, atterraggi, touch-and-go, flyover);
- Numero di operazioni di ogni tipo in un giorno medio di riferimento;
- Traiettoria tridimensionale intesa come profilo verticale e traccia a terra, schematizzata come serie di segmenti rettilinei (relativa ad ogni operazione);
- Caratteristiche dell'aeroporto (altitudine, temperatura e pressione medie, dati anemometrici);
- Posizione dei ricettori rispetto alle rotte.

Nella tabella 4, sono riportati i principali standards adottati per la modellizzazione del rumore aeroportuale.

Tabella 4: principali standards del rumore aeroportuale

Standard	Nazione	Note
European Civil Aviation Conference, ECAC 29 "Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports"	EU	Metodologia ad interim suggerita dalla comunità europea per il calcolo del rumore aeroportuale, riprende l'INM per le tecniche di segmentazione
Integrated Noise Model, INM	USA	Metodologia americana che valuta i potenziali impatti del rumore degli aerei nelle vicinanze degli aeroporti. Sviluppato sulla base di algoritmi elaborati dalla SAE
AzB/ DIN 45684-1	Germania	Metologia e norma nazionale tedesca per il calcolo del rumore aeroportuale

Due progetti della Comunità Europea, Harmonoise e Imagine (http://www.imagine-project.org/), rispettivamente il primo relativo al rumore da traffico stradale e ferroviario e il secondo relativo al rumore industriale e degli aeromobili, hanno lo scopo di fornire agli stati membri gli standards a cui riferirsi per la redazione delle mappature acustiche strategiche e per valutare l'efficacia dei piani d'azione del rumore, nonché per qualunque problematica relativa al rumore in ambiente esterno.

LA SCELTA DEL MODELLO ACUSTICO APPROPRIATO

La scelta dell'opportuno modello va fatta conoscendo a priori il grado di complessità della situazione che si va ad analizzare e il tipo di risultati che si vogliono ottenere. Risulta evidente che, per casistiche in cui una valutazione di impatto acustico riguardi un'area poco estesa e con pochi ricettori associati ad un modesto numero di sorgenti sonore e ad una conformazione orografica relativamente semplice (si pensi ad un terreno piatto e la presenza di pochi ostacoli), si può procedere attraverso l'utilizzo di formule matematiche che possono essere risolte attraverso semplici calcoli, oppure implementate in fogli di calcolo elettronici, supportando il semplice modello anche con opportune misurazioni sul campo. La scelta di preferire le misurazioni rispetto ai modelli di simulazione per descrivere il clima acustico di un'area, dipende anch'essa dalle dimensioni dell'area da mappare, dal grado di dettaglio che si vuole ottenere e dalla disponibilità della strumentazione di misura per periodi di tempo medio lunghi (quindi anche di possibilità di sostenere importanti costi).

Quando invece il grado di complessità aumenta per causa, ad esempio, di un'articolata orografia, per la presenza di numerosi ostacoli alla propagazione del suono, per via delle condizioni meteoclimatiche, per la presenza di vegetazione, per le caratteristiche del terreno, per la presenza di diverse sorgenti sia come tipologia che come quantità, per il numero di ricettori da analizzare ecc., i modelli di calcolo via software risultano molto utili se non indispensabili, soprattutto in termini di affidabilità del risultato finale (si pensi ad esempio agli adempimenti previsti dalla normativa comunitaria 2002/49/CE per la redazione delle mappature acustiche strategiche del territorio e per la predisposizione dei piani di risanamento acustico).

La modellizzazione dell'area di studio

L'attendibilità dei risultati non può prescindere dall'accurata modellizzazione dell'area di studio. In tal senso, vanno modellati tutti quegli oggetti acusticamente attivi (sorgenti e ricettori) e passivi (edifici, schermi, vegetazione, terreno ecc.) ritenuti rilevanti ai fini dello studio.

Risulta, in genere, necessario avere a disposizione i seguenti dati:

- Planimetria 3D dell'area interessata in formato digitale sia dello stato di fatto che dell'eventuale stato di progetto;
- Altezze degli edifici;
- Posizione delle diverse sorgenti e dei ricettori;
- Dati caratterizzanti le tipologie di sorgenti sonore (potenza sonora, direttività, flussi orari di traffico o numero di convogli ferroviari per periodo di riferimento, rotte e tipologie dei velivoli, caratteristiche delle infrastrutture ecc.);
- Tracciato planimetrico e altimetrico delle infrastrutture di trasporto;
- Caratteristiche meteoclimatiche dell'area.

I moderni strumenti software permettono di interfacciarsi ed integrarsi con programmi di tipo GIS e CAD, in modo da fornire la possibilità di inserire in maniera semplice i dati relativi alla morfologia del terreno, agli edifici, alle sorgenti, ai ricettori e agli ostacoli, ed offrono la possibilità di editare in un ambiente intuitivo gli oggetti presenti nel modello favorendo l'accurata ricostruzione digitale dell'area (figura 1),

importante poiché il territorio tutto influenza la propagazione acustica sia per la sua conformazione geometrica, sia per le caratteristiche di assorbimento, riflessione e diffrazione che possiede assieme a tutti gli oggetti in esso presente.

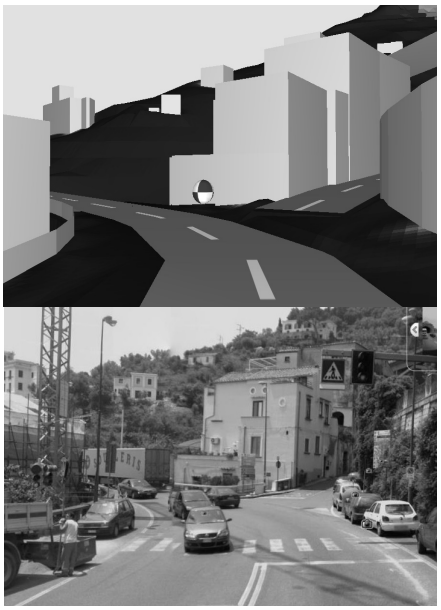


Figura 1: Particolare della modellazione 3D del territorio, confrontato con un'immagine reale

Gli effetti meteoclimatici

Nei modelli di calcolo si fa solitamente uso di algoritmi che tengono in considerazione l'attenuazione acustica dovuta all'assorbimento atmosferico (dipendenti dalla temperatura e dall'umidità), ignorando effetti dovuti alle disomogeneità atmosferiche come i gradienti di temperatura e di vento (che generano effetti di incurvamento delle onde sonore) e alla variabilità nel tempo delle condizioni climatiche. Anche se in genere viene richiesta una valutazione nelle condizioni climatiche prevalenti della zona, risulta comunque problematico avere dati significativi senza considerare i gradienti termici e di vento che delle volte sommano i loro effetti e in altre si compensano a vicenda (si pensi a studi effettuati in zone particolarmente ventose quali aree di centrali eoliche, nei pressi delle coste, in zone piatte e con scarsa vegetazione); trascurare questi effetti in ricettori o aree abbastanza distanti dalle sorgenti (dell'ordine delle centinaia di metri) può causare delle variazioni importanti (che possono superare anche i 5 dB e comportare il superamento dei limiti della classe acustica dell'area).

La norma ISO 9613 riferisce tutti i calcoli ad una condizione meteorologica di base riferita a condizioni favorevoli alla propagazione (direzione del vento compresa in un angolo di ± 45° con la direzione sorgente – ricettore, velocità del vento variabile tra 1 e 5 m/s per altezze comprese tra 3 e 11 m dal suolo), da cui poi poter ricavare il livello a lungo termine attraverso un termine correttivo che dipende dalle statistiche meteorologiche locali oltre che dalla mutua distanza tra sorgente e ricettore e dall'altezza dal suolo. Tale standard, anche garantendo un'accuratezza contenuta in 3 dB per il livello globale a lungo termine, non permette di rappresentare il comportamento della rumorosità di un'area in specifiche condizioni meteorologiche. Per tener conto delle diverse condizioni atmosferiche può essere impiegato lo standard Concawe, sviluppato negli anni '80 in Europa per il calcolo del rumore relativo agli impianti dei complessi petrolchimici. Tale modello ha la capacità di considerare gli effetti meteorologici sulla propagazione del rumore su grandi distanze (implementando nell'algoritmo diversi parametri atmosferici), anche se mostra una trattazione poco accurata per quanto riguarda l'attenuazione degli ostacoli lungo la propagazione del suono poiché non considera gli effetti sui bordi verticali degli ostacoli, quindi si presta bene in quei casi in cui vi sia uno scarso numero di ostacoli.

Il modello NMPB-Routes-96 per il rumore da traffico stradale, per quanto riguarda la propagazione e gli aspetti atmosferici migliora l'algoritmo della ISO 9613, ricercando due condizioni meteo tipo: "condizioni favorevoli alla propagazione" (corrispondenti a quelle della norma ISO) e "condizioni atmosferiche omogenee" (corrispondenti ai metodi di calcolo utilizzati precedentemente in Francia). Il risultato finale di una previsione a lungo termine si ottiene sommando i contributi derivanti dalle due condizioni tipo, ponderandoli secondo le percentuali di effettiva presenza sul sito considerato. Tale metodo non descrive tutte le situazioni meteo osservabili in un particolare sito, ma le approssima rappresentandole con due tipi di situazioni atmosferiche convenzionali cercando di individuare una situazione "media", che tiene effettivamente conto del disturbo verso l'individuo sul lungo periodo, poiché tali condizioni hanno una influenza determinante nella propagazione a distanza.

I dati meteo riferiti ai singoli siti, possono essere ottenuti in diversi modi:

- Desumere i dati di presenza delle condizioni favorevoli ed omogenee da tabelle fornite in allegato al modello che sono del Servizio Meteorologico Nazionale Francese, che ha rilevato tali dati in 40 stazioni collocate su tutto il territorio;
- Elaborare dati meteo locali esistenti sul lungo periodo;
- Elaborare dati meteo locali raccolti in proprio, almeno su un periodo annuale;
- Adottare le tabelle fornite in allegato al modello, anche se non c'è similitudine con il sito reale, usando però valori cautelativi.

La modellazione acustica di sorgenti non convenzionali

Spesso capita di dover modellare delle tipologie di sorgenti che non possono essere semplicemente trattate come puntuali, lineari o areali e risolte in maniera immediata con gli algoritmi di calcolo già elencati, oppure con sorgenti che non sono standardizzate attraverso qualche norma internazionale. La casistica è abbastanza ampia e le principali difficoltà sono la corretta scomposizione in sorgenti elementari e l'assegnazione dell'esatto livello di potenza sonora.

Di seguito, saranno considerati gli esempi relativi alla modellazione acustica di gallerie e parcheggi.

Il suono irradiato da una galleria verso l'esterno viene spesso trascurato eliminando semplicemente il tunnel dal modello. Ma questo contributo può produrre un localizzato incremento del livello sonoro nelle vicinanze delle aperture che non può essere trascurato. In prossimità dell'apertura di una galleria, infatti, devono essere presi in considerazione i contributi relativi al suono diretto irradiato all'esterno, al suono che viene irradiato dalla strada all'interno del tunnel ed è diffratto sui bordi dell'apertura e l'aliquota di suono riflesso sulle superfici interne del tunnel verso l'esterno. L'emissione sonora di un tunnel (in termini di potenza e direttività) si può simulare con una sorgente areale avente forma e dimensioni dell'apertura (figura 2), la cui emissione è funzione

dell'emissione del traffico che caratterizza la strada o la ferrovia a cui si riferisce, della forma e dimensioni dell'apertura, della lunghezza della galleria e dell'assorbimento acustico che caratterizza il suo interno.

Anche la sorgente sonora "parcheggio" non è standardizzata da algoritmi normalizzati e dunque risulta estremamente difficoltoso poter introdurre un dato di potenza sonora per tale tipo di sorgente.

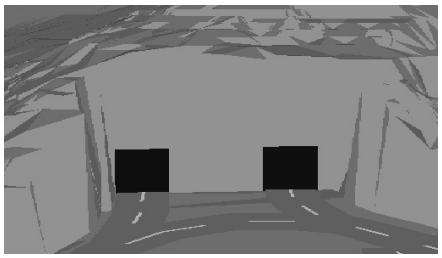


Figura 2: Particolare della modellazione di gallerie con superfici emittenti areali

I parcheggi sono correlati alla presenza di un parco auto circolante e connessi con la struttura a cui fanno riferimento (un centro commerciale, un luogo ricreativo ecc.) e dunque il loro contributo in termini di inquinamento acustico va separato dal quello del parco auto circolante sulle vie pubbliche. In letteratura esistono diversi studi relativi all'emissione sonora dei parcheggi, lavori soprattutto provenienti dalla Germania (il più completo è lo studio della Regione Federale Bavarese). Facendo riferimento a questi studi, l'emissione sonora associata al parcheggio di una vettura si può suddividere in più fasi, che generalmente sono:

- Il percorso delle vie di accesso alle corsie di parcheggio;
- La ricerca del posto auto libero;
- L'operazione di parcheggio vera e propria;
- L'apertura e la chiusura delle portiere.

Ciascuna di queste operazioni dà luogo ad una emissione sonora legata alla storia temporale del segnale acustico. A partire dalla storia temporale di un singolo movimento di parcheggio, si risale all'emissione sonora in termini di potenza sonora distribuita su un'area. Una distinzione va fatta distinguendo fra l'operazione di parcheggio completa (che tiene conto del contributo del singolo movimento di parcheggio relativo al singolo posto auto e del contributo delle vie di accesso al posto auto stesso, nonché del traffico circolante nel parcheggio alla ricerca di un posto auto) e di operazione di parcheggio limitata al singolo parcheggio nel singolo posto auto, senza tener conto del contributo dovuto alle vie di accesso al posto auto e della ricerca del posto libero. Nel primo caso si parla di "metodo integrato" (descritto dalla DIN 18005-2 del 1987) e nel secondo caso di "metodo separato" (in questo caso il contributo del traffico sulle vie di accesso e della ricerca di parcheggio viene considerato e calcolato secondo uno standard diverso, che può essere uno dei metodi standardizzati per il traffico stradale, tipicamente RLS 90 in Germania e RVS 3.02 in Austria). Il parametro principale che caratterizza l'emissione sonora di un parcheggio è il numero di movimenti veicolari nell'unità di tempo e relativi ad un'unità di riferimento che è un parametro fondamentale per caratterizzare l'emissione sonora di una tipologia di parcheggio. Essa può essere il numero stesso di posti auto del parcheggio, ma anche un diverso parametro correlato con le caratteristiche del tipo di parcheggio. Per ottenere l'emissione sonora di un parcheggio occorre conoscere la tipologia del parcheggio (a servizio di un ristorante, di una discoteca, di un supermercato ecc.), il parametro che caratterizza il servizio (la superficie di vendita netta del ristorante, la superficie netta della discoteca, del supermercato, il numero di posti auto ecc.) e la collocazione urbanistica. Nel caso particolare di un parcheggio al chiuso (figura 3), che presenta delle aperture verso l'esterno il calcolo può essere affrontato seguendo i successivi step:

- Determinazione del livello di potenza sonora del parcheggio con i metodi descritti;
- Determinazione del livello di potenza sonora interna all'ambiente;
- Determinazione della potenza sonora emessa verso l'esterno;
- Calcolo della propagazione sonora nell'ambiente esterno.



Figura 3: Particolare dell'emissione sonora relativa a due parcheggi al chiuso che presentano delle aperture verso l'esterno

L'INCERTEZZA DEI MODELLI PREVISIONALI

L'incertezza nei modelli di calcolo previsionali deriva da diversi fattori, alcuni dipendenti dall'operatore, altri intrinseci al software utilizzato.

L'incertezza dei livelli sonori calcolati si può schematizzare attraverso i seguenti contributi:

- Incertezza relativa ai dati di ingresso;
- Incertezza nel modello matematico;
- Incertezza nel modello software;
- Incertezza relativa alla rappresentazione dei dati di output;
- Incertezza nel modello costruito.

I dati in ingresso si possono distinguere in tre grandi categorie: dati di tipo acustico (tipologia delle sorgenti, potenza sonora, direttività, spettro sonoro), dati di tipo geometrico (conformazione del territorio, posizione delle sorgenti e dei ricettori, effetti di riflessione ecc.) e dati di tipo non geometrico (flussi veicolari, velocità dei veicoli, caratteristiche dell'infrastruttura, distribuzione della popolazione, variazione dei flussi orari veicolari, caratteristiche del suolo ecc.).

L'incertezza associata ai dati di ingresso contribuisce in maniera importante all'accuratezza del risultato fornito dal modello. I dati di ingresso possono essere acquisiti con diversi livelli di accuratezza: maggiore accuratezza implica in generale costi più elevati, tempi più lunghi e metodologie di rilievo più sofisticate. Un modo per controllare l'incertezza sui dati di ingresso può essere quello di utilizzare i "Toolkit" descritti nel documento "*Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure*" del gruppo di lavoro della Commissione europea WG – AEN, Assessment of Exposure to Noise. I

toolkit suggeriscono orientativamente, in funzione delle informazioni disponibili, le metodologie più appropriate per generare i dati necessari all'elaborazione delle stime oltre a fornire indicazioni di massima sulla loro complessità, accuratezza e costo.

Il modello matematico di base presenta sempre un'insufficiente rappresentatività, a causa del fatto che ogni modello non è altro che un'approssimazione più o meno accurata della realtà. La validità di un modello matematico dipende anche dal consenso che riscuote nella comunità scientifica. L'altra causa di incertezza è dovuta al fatto che il documento che lo descrive può contenere delle ambiguità derivati da semplificazioni della realtà, che gli sviluppatori software sono portati ad interpretare.

Altri problemi che riguardano gli sviluppatori sono il possibile verificarsi di errori di implementazione delle equazioni base e la necessità di ottimizzazione degli algoritmi, necessaria se si vogliono migliorare le prestazioni del software. Un'ulteriore incertezza, sempre insita nel software, è legata alle differenti tecniche di interpolazione e rappresentazione dei risultati. Il metodo migliore per verificare la qualità dell'implementazione di un metodo di calcolo standardizzato in un software commerciale è l'impiego di test, che se ben progettati, consentono di mettere in luce tutte le criticità presenti. Attualmente, alcune indicazioni possono scaturire dal metodo finlandese Nordtest, descritto nel documento "*Framework for the verification of environmental noise calculation software*", che indica le procedure di verifica e successiva conformità dei software di calcolo del rumore ambientale. Di una certa importanza è anche la norma sperimentale tedesca DIN 45687 "*Acoustics – Software products for the calculation of the sound propagation outdoors - QSI-Dataformat and QSI-Model-File*", che si occupa di valutare l'incertezza dovuta al software nel processo di calcolo. Sarebbe opportuno che i diversi software fossero controllati con casi di prova prestabiliti e che i risultati fossero certificati da una terza parte indipendente dagli sviluppatori e dagli utilizzatori. L'analisi dell'incertezza ed i limiti di validità del modello dovrebbero poi essere forniti dai produttori di software agli utilizzatori. Tutto ciò è l'analogo della procedura di taratura a cui si sottopone periodicamente uno strumento di misura.

Le incertezze relative al modello costruito, dipendono fortemente dall'operatore, dal dettaglio e dall'impiego dei dati di ingresso e dalle procedure di calibrazione impiegate, partendo da dati provenienti da una serie di rilievi reali (processo analogo ad una calibrazione in campo di uno strumento prima di una misura). Una metodologia di calibrazione dei modelli è contenuta nella norma tecnica nazionale UNI 11143-1 "*Acustica. Metodo per la stima dell'impatto e del clima acustico per tipologia di sorgenti. Parte 1: Generalità*". Nell'appendice di tale norma viene descritta una procedura di calibrazione con riferimento a misure reali (figura 4) che permette di ridurre l'incertezza associata all'uso del modello, anche se naturalmente introduce tutte le componenti di incertezza relative alle misurazioni reali. Un'altra metodologia di calibrazione è quella messa appunto dal CIRIAF per quanto riguarda la valutazione dell'impatto acustico delle centrali termoelettriche, che fa anch'essa riferimento al confronto con misurazioni reali. L'esperienza dimostra, infatti, che un'adeguata calibrazione per confronto con misurazioni porta ad una riduzione del valore finale dell'incertezza tipo composta.

Poiché i dati misurati sono anch'essi affetti da incertezza, nel valutare l'incertezza del risultato prodotto dal modello occorre tenere conto anche dell'incertezza associata alle misure. Attualmente, diversi studi sono stati sviluppati o sono ancora in atto riguardo la caratterizzazione delle sorgenti industriali, nelle quali, attraverso diversi metodi di prova consolidati per la determinazione della potenza sonora di targa, sono anche trattati i problemi relativi alla determinazione dell'incertezza di misura. Altri studi sull'incertezza e sull'analisi di sensibilità di diversi modelli per il rumore da traffico stradale, aeroportuale, ferroviario e da sorgenti industriali (in particolare i modelli ad interim indicati dalla direttiva europea ed il modello Harmonoise) sono condotti da centri di ricerca universitari e attraverso programmi di ricerca europei. Tali studi risultano finalizzati a migliorare i modelli e a cercare di quantificare l'entità dell'incertezza che è insita in ogni modello matematico.

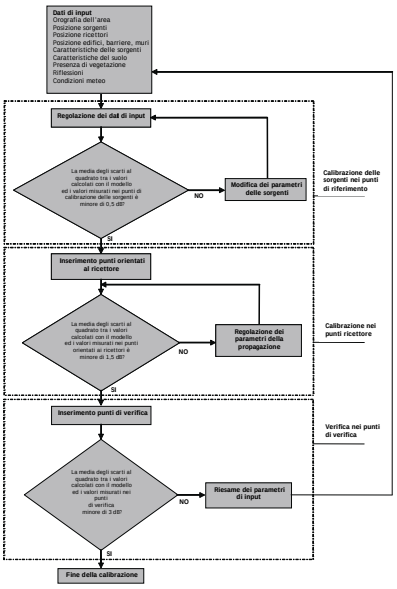


Figura 4: Schema a blocchi della procedura di calibrazione secondo la UNI 11143-1

CONCLUSIONI

In questo articolo sono stati messi in luce alcuni aspetti relativi agli strumenti di calcolo per la modellizzazione ed il calcolo del rumore in ambiente esterno. Tali strumenti, grazie alle nuove normative comunitarie e al progresso della ricerca e della tecnologia, diventano sempre più dei validi supporti a disposizione degli operatori, i quali però devono essere in grado di affrontare le problematiche connesse , al fine di sfruttarne a pieno tutte le potenzialità.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. R. Mariconte, G. Bignardi, I modelli previsionali del rumore per ambiente esterno: caratteristiche, impiego e problematiche connesse, IS News Magazine dell'ingegneria salernitana, Anno 3, N. 2.
2. G. Elia, La valutazione del rumore ambientale: quale ruolo per i modelli di calcolo
3. M. Mariani, R. Mariconte, A. Nebbioso, A. Papa, C. Simeoni, L'incertezza associata alle misurazioni del rumore ambientale, atti del 1° convegno sulla Goverance del Rumore Ambientale.

4 DataKustik GmbH, Manuale operativo Cadna.

MONITORAGGIO ACUSTICO PISTE MOTORISTICHE SETTORE VELOCITÀ ADEMPIMENTI NORMATIVI E REGOLAMENTAZIONE SPORTIVA

Giancarlo Strani[1], Cristiano Luci[1], Massimo Fiorentino[2]

[1]BIONOISE Ingegneria Ambientale, V. Gagarin 3, CORCIANO (PG)
[2]FEDERAZIONE MOTOCICLISTICA ITALIANA, Viale Tiziano 70, ROMA

SOMMARIO

La Federazione Motociclistica Italiana (FMI), attraverso il suo organo tecnico Federmoto, ha avviato da anni una serie di studi sulle emissioni di rumore da attività motoristica; per il settore velocità, è stato costituito un tavolo tecnico con i principali gestori degli autodromi italiani, che nell'attività quotidiana devono confrontarsi con i vincoli imposti dal DPR 304/2001 in applicazione della Legge 447/1995 sulle emissioni sonore.

Le attività condotte con la Federazione hanno portato ad eseguire monitoraggi in varie condizioni operative di due piste, Franciacorta e Misano, durante le quali sono state seguite rilevazioni fonometriche sia in ambito circuito che nei dintorni, sia sulle moto presenti secondo la modalità di misura statica allo scarico. Inoltre, è stato sperimentato un nuovo metodo di misurazione del rumore emesso dalle singole moto, basato sul criterio dinamico, che in prima ipotesi avrebbe dovuto sostituire quello statico: i dati raccolti a Franciacorta e Misano, hanno permesso di avviare un confronto con la Federazione Internazionale sulle problematiche e l'incertezza di questo metodo, poi abbandonato.

Il presente lavoro, svolto in ambito FMI, è dovuto alla passione e competenza del compianto Dr. Alberto Morresi, vicepresidente FMI e presidente del settore tecnico FMI.

INTRODUZIONE

Da qualche anno la Federazione Motociclistica Italiana (FMI) ha avviato una serie di studi sulle emissioni di rumore delle moto, attraverso il suo organo tecnico Federmoto.

L'obiettivo è quello di trovare soluzioni tecniche che permettano di ridurre le emissioni acustiche da una singola moto, con l'ulteriore obiettivo di diminuire i livelli acustici prodotti durante le normali attività nelle piste motoristiche.

Le emissioni acustiche delle moto in pista sono disciplinate dai regolamenti sportivi che, per ogni categoria, stabiliscono un valore limite di emissione per le moto, valutato con opportuna prova fonometrica prima di ogni competizione.

Per le emissioni delle piste è invece in vigore il DPR 304/2001 che, in applicazione alla Legge Quadro 447/1995, definisce appositi valori limite, che costituiscono un vincolo fondamentale per le attività quotidiane.

Nel presente documento viene presentato un nuovo metodo di analisi delle emissioni delle moto, basato sulla dinamica delle moto stesse, e sperimentato in due sessioni di prova nell'anno 2008; nelle intenzioni della Federazione Internazionale (FIM), tale metodo avrebbe dovuto sostituire il classico metodo statico nel discriminare le emissioni acustiche delle moto, prima del loro ingresso in pista nelle competizioni internazionali.

ATTIVITÀ FMI

Negli ultimi anni l'attività della Federazione Motociclistica Italiana si è concentrata, nel settore rumore, nella possibilità di trovare soluzioni per diminuire le emissioni acustiche delle moto. Il problema nasce non tanto all'interno dei circuiti, dove per gli appassionati il rombo di una moto è un rumore familiare ed, anzi, stimolante, ma evidentemente all'esterno dove vengono a crearsi contrasti con un ambiente che vede spesso presenza di ricettori abitativi od altri, che andrebbero tutelati da un punto di vista acustico.

Per tale motivo, la Federazione sta cercando di studiare il fenomeno di emissione sonora delle moto per offrire un proprio contributo su tale problematica.

Lo studio BIONOISE ha affiancato la Federazione in questa ricerca; negli ultimi anni gli sforzi sono stati concentrati principalmente sulla disciplina motocross, con interessanti risultati. In tale disciplina, in collaborazione con la Federazione, sono stati condotti moltissimi test sulle moto durante sessioni di prova dedicate o a margine di competizioni nazionali od internazionali. I rilievi fonometrici sono stati eseguiti sia nei dintorni dei circuiti, al fine di ottemperare agli adempimenti per le piste imposti dal DPR 304, sia sulle moto allo scopo di analizzare i valori di emissione.

L'analisi di emissione acustica delle moto da cross, è stata effettuata con il classico metodo della statica (Fig. 1), ovvero misurando il livello sonoro prodotto ad uno specifico numero di giri, diverso per ogni cilindrata.

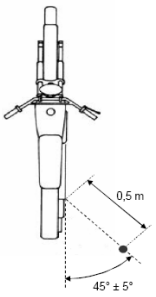


Figura 1: Metodo "statico" di rilievo fonometrico

Nel 2008, su spinta della Federazione Internazionale, si è iniziato ad effettuare dei test sulle moto con il metodo dinamico, che avrebbe dovuto sostituire quello statico, fornendo un valore più rispondente alla dinamica della moto. Per raccogliere ed analizzare le varie esperienze tecniche, la Federazione Italiana nel 2008 ha aperto un tavolo tecnico di lavoro per affrontare il problema rumore con i principali gestori degli autodromi italiani (Franciacorta, Magione, Misano, Mugello, Vallelunga, Varano) in collaborazione con alcune case motociclistiche (Aprilia, Benelli, Beta, Honda Europe, Honda Italia, Kawasaki, MVaugusta, Scorpa, Tm, Yamaha Italia) e con i costruttori di silenziatori scarico gas (Arrow, LeoVince). In seguito a ciò, FMI e BIONOISE, grazie alla collaborazione dei rispettivi circuiti e della Yamaha Italia, hanno condotto con il nuovo metodo molte prove di emissione sulle moto, in due sessioni distinte negli autodromi di Franciacorta e Misano.

Il metodo dinamico

Il test dinamico di analisi delle missioni delle moto è basato sulla tecnica descritta nella Norma ISO 7188:1994 "Measurement of noise emitted by passengers cars under conditions representative of urban driving", norma che specifica un metodo per misurare il rumore emesso dalle autovetture e dai veicoli a motori in genere, in movimento. Per l'analisi delle emissioni sonore delle moto in movimento è stato impiegato un metodo ispirato a quello descritto nella norma, secondo il test in accelerazione.

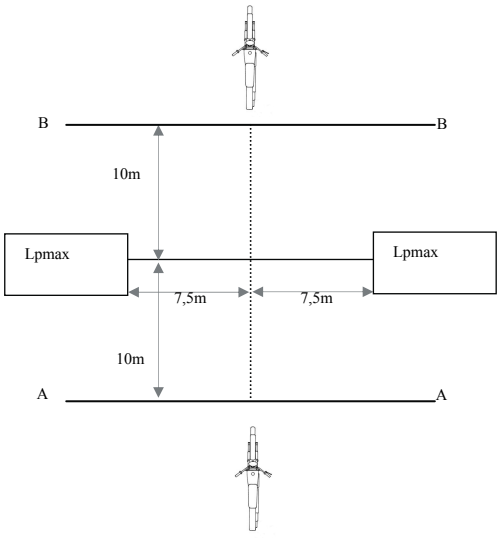


Figura 2: Metodo "dinamico" di rilievo fonometrico

Il metodo consiste nel misurare il livello di pressione sonora massimo durante il passaggio di una moto tra due linee ideali distanti 20 m tra loro (AA e BB in figura); la moto deve avere una velocità di ingresso in corrispondenza della linea AA pari a 50 km/h ed accelerare fino alla linea BB.

I valori di pressione sonora vengono misurati contemporaneamente in due postazioni fonometriche, disposte ciascuna a 7,5 m rispetto alla linea mediana di passaggio della moto, e in posizione intermedia rispetto alle due linee AA e BB. Il passaggio di ciascuna moto viene ripetuto per due volte: per ogni lato, viene preso in considerazione il valore più alto, dopodiché viene effettuata una media tra i due valori.

FRANCIACORTA, 15 MAGGIO 2008

L'Autodromo di Franciacorta, in attuale fase di completamento del tracciato e dell'impianto (Fig.3) ,è specializzato per prove in pista di automobili e di moto, al suo interno si svolgono sessioni di guida sicura ed altre attività, gare ed eventi di caratura nazionale.

La sessione di misure fonometriche nell'Autodromo di Franciacorta è avvenuta il 15 maggio 2008, in accordo con la FMI e con i gestori dell'Autodromo, durante una classica giornata di attività in pista: le moto oggetto di test fonometrici sono state messe cortesemente a disposizione da privati che in quel giorno hanno scelto di girare nel circuito. I gestori dell'Autodromo, in particolare nella persona del Presidente Ettore Bonara, hanno concesso, per la giornata di sessione fonometriche, gli spazi necessari dove poter effettuare prove sia del metodo statico che di quello dinamico.



Figura 3: Immagine dell'Autodromo di Franciacorta

Le attività svolte nell'autodromo, in collaborazione con i tecnici della FMI e dei tecnici dei gruppi aziendali italiani produttori di silenziatori per moto (Arrow e LeoVince), sono state:

- rilievo fonometrico con il metodo della statica su un gruppo di 19 moto, pronte ad entrare in pista (Fig.4);



Figura 4: Rilievo fonometrico della "statica"

- rilievo fonometrico in dettaglio su 4 moto di differente cilindrata con il metodo statico, sia secondo Regolamento Federmoto [1] sia in 4 postazioni intorno ad essa, alle distanze di 1 e 5 m dalla moto stessa;
- rilievo fonometrico, con il metodo dinamico, su 3 delle 4 moto testate in dettaglio col metodo statico (Fig.5);



Figura 5: Rilievo fonometrico della "dinamica"

- rilievo fonometrico col metodo statico di due gruppi di circa 25-30 moto ciascuno, di cui il primo con moto dotate di dBkiller ed il secondo senza;
- rilievi fonometrici, in ambito sedime e dintorni del circuito, in due sessioni da 15 minuti ciascuna, rispettivamente con in pista il primo gruppo di moto con dBkiller ed il secondo gruppo di moto senza dBkiller.

Le rilevazioni fonometriche nella giornata di sessione a Franciacorta hanno avuto il duplice scopo di analizzare l'impatto acustico sui ricettori circostanti la pista dovuto alle attività dell'Autodromo e di raccogliere, tramite test su moto, valori fonometrici rilevati con il nuovo metodo dinamico, così da poterne analizzare la validità, anche nel confronto col metodo statico.

Per quanto riguarda i valori ottenuti dalle rilevazioni fonometriche sulle moto, possono essere fatte diverse considerazioni.

Nelle Fig. 6-8 sono riportate le dispersioni dei valori ottenuti sottoponendo le moto al test della misura statica, per i tre gruppi di moto definiti in precedenza: quello misto, quello con dBkiller e quello senza dBkiller. Rispetto al limite di 102 dB (limite iniziale definito dai regolamenti FMI), si nota come gran parte del gruppo di moto dotate di silenziatore rientri nel limite imposto, cosa non valida invece per l'ultimo gruppo di moto.

La differenza tra i due valori medi dei due gruppi di statiche con/senza dBkiller è pari a 4,6 dB(A).

In Fig. 9 è riportato invece un grafico riepilogativo degli stessi valori, per marca di moto, con dispersione intorno al valore limite di 102 dB.

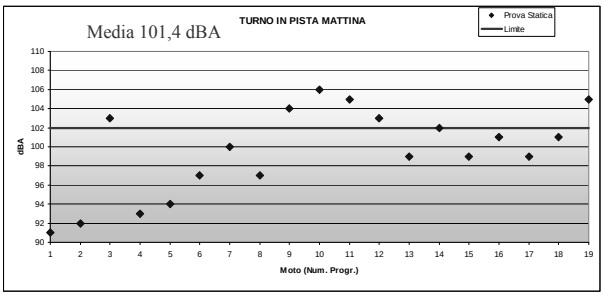


Figura 6: Dispersione valori da metodo statico: gruppo moto misto

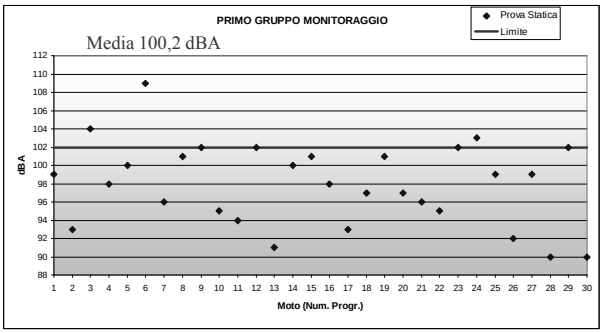


Figura 7: Dispersione valori da metodo statico: moto con dBkiller

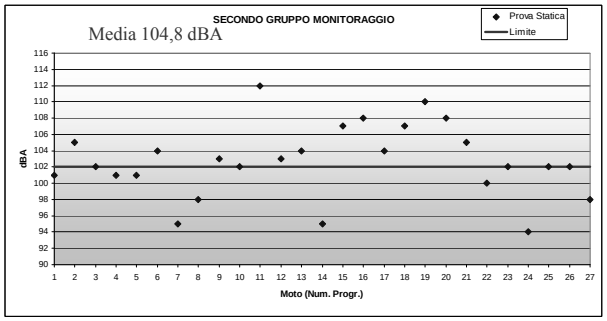


Figura 8: Dispersione valori da metodo statico: moto senza dBkiller

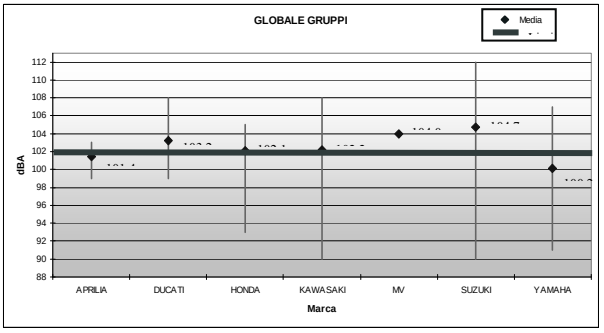


Figura 9: Dispersione valori da metodo statico per marca

Si è inoltre cercato di individuare una correlazione tra i risultati forniti dalle misurazioni effettuate col metodo statico e col metodo dinamico, effettuate sulle stesse moto. In tabella 1 sono confrontati, per ogni moto, il valore della statica rilevato secondo il Regolamento Federmoto [1] con quello della dinamica definito come descritto in precedenza.

I risultati ottenuti testimoniano che i dati raccolti sono insufficienti per una valida correlazione tra i due metodi e scarsamente attendibili anche a causa del rumore proveniente dall'attività in pista che ha influito sulle misure.

Tabella 1: Cconfronto valori metodi statico e dinamico

Moto	**Cilindrata**	**Misura effettuata dB(A)**	
		Statica	*Dinamica*
HONDA CBR	600	93	84,4
YAMAHA R6	600	92,5	85,5
DUCATI	750	105	-
DUCATI	1000	103	89,8

L'impatto della pista sul territorio circostante è stato analizzato invece, svolgendo il lavoro in due fasi successive che hanno previsto la raccolta di dati fonometrici e la modellazione in 3D dell'intera area con software Mithra, con analisi della propagazione acustica. I dati fonometrici sono stati raccolti tramite 4 fonometri disposti durante i rilievi sia a bordo pista che nei pressi dei ricettori abitativi più vicini alla pista, ed integrati con quelli generati dalle 2 centraline di monitoraggio della pista in postazioni fisse all'interno del sedime. Successivamente, nel software è stato fedelmente ricostruito il 3D dell'area ed è stata inserita la sorgente "pista", ovvero una sorgente lineare [2], avente il percorso del tracciato dell'Autodromo, a cui è stata assegnata una potenza sonora specifica calcolata tramite algoritmo a partire dai rilievi fonometrici eseguiti. L'algoritmo individuato definisce la potenza sonora lineare della sorgente pista ($L_{w/m}$) in funzione della potenza sonora L_{wi} della singola moto, della velocità media di percorrenza del tracciato e di alcuni coefficienti correttivi associati alla cilindrata ed alla tipologia delle moto.

In particolare la simulazione acustica è stata effettuata distinguendo la condizione con il gruppo di moto in pista dotate di dBkiller da quella in cui le moto girano senza silenziatore (Fig. 10). Le analisi di propagazione acustica hanno mostrato valori immessi ai ricettori dall'attività in pista, nei limiti di legge secondo quanto previsto dal DPR 304/2001.

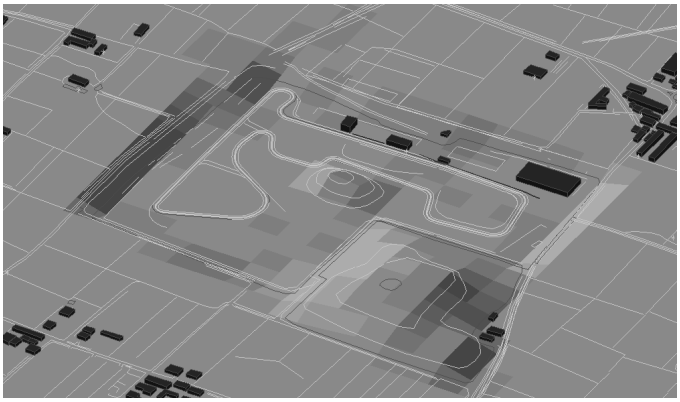


Figura 10: Sorgente "pista" Autodromo di Franciacorta

In Fig. 11 si evidenzia l'area investita da un certo valore acustico nelle due sessioni di prove, caratterizzate da moto con valore medio che differisce, tra i due gruppi esaminati, di 4,6 dBA. I valori riportati in figura derivano dall'analisi del modello acustico tarato con le misurazioni descritte in precedenza.

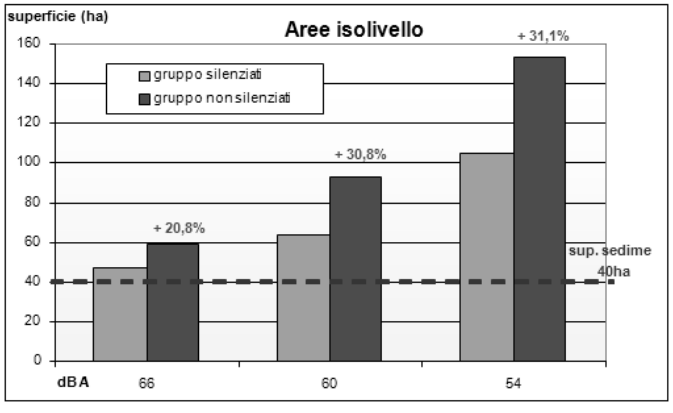


Figura 11: Area investita da un certo valore acustico nelle sessioni

MISANO, 04 LUGLIO 2008

Nella giornata di Misano l'attenzione è stata rivolta, rispetto a Franciacorta, all'approfondimento dei rilievi fonometrici col metodo dinamico. L'impatto acustico della pista è stato esaminato, a parte, consultando i dati rilevati in quel giorno dalle 4 centraline di monitoraggio acustico disposte nei dintorni del circuito, senza ulteriori rilievi fonometrici.

La sessione di misure a Misano è stata eseguita il 4 luglio 2008, primo dei tre giorni dello Yamaha Fest in Italia, con la collaborazione della FMI e dei costruttori di silenziatori Arrow e LeoVince. L'attività svolta può essere così riepilogata:

- rilievo fonometrico in dettaglio su 8 moto di differente cilindrata con il metodo statico, sia secondo Regolamento Federmoto [1] sia in 4 postazioni intorno ad essa, alle distanze di 1 e 5 m dalla moto stessa;
- rilievo fonometrico, con il metodo dinamico, sulle 8 moto Yamaha testate col metodo statico: le postazioni di rilievo sono state aumentate rispetto a quelle previste dalla normativa, così da effettuare un'indagine fonometrica più accurata;
- rilievo fonometrico, con il metodo statico, su 32 moto casuali, divise nei due gruppi R-Series e Sportive;
- test su singola moto Yamaha R6: rilievo fonometrico con il metodo statico con acquisizione di diversi valori del livello sonoro emesso al variare dei giri motore.

In Fig.12 sono riportati i risultati di tutte le moto testate col metodo statico: gran parte delle moto rientra nel limite di 102 dB imposto dal Regolamento Federmoto [1]; per i due gruppi di moto testati, R-Series e Sportive, si sono avuti valori medi della statica rispettivamente pari a 99,3 dB(A) e 99,1 dB(A).

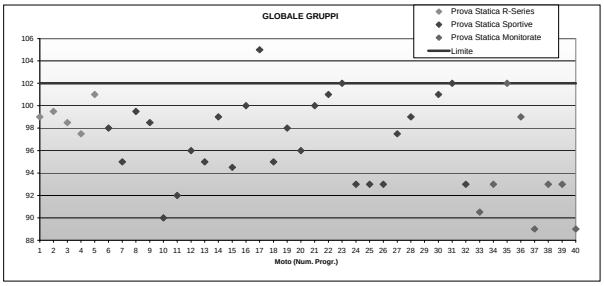


Figura 12: Andamento "statica" moto testate

I test di Misano hanno permesso, rispetto a quelli eseguiti a Franciacorta, di effettuare un'analisi più approfondita tra i valori rilevati col metodo statico e quelli col metodo dinamico. In particolare, sono stati messi a confronto, per ogni moto, il valore rilevato col metodo statico secondo il Regolamento Federmoto [1] con quello ottenuto dal metodo dinamico (Fig.13), determinando una legge di correlazione.

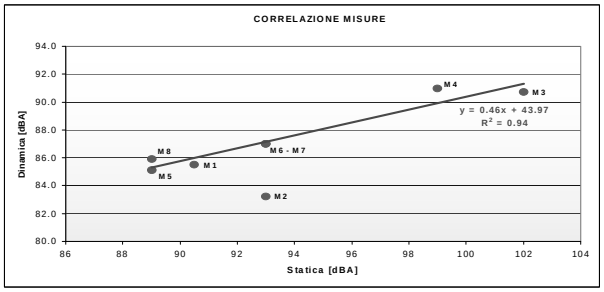


Figura 13: Correlazione valori metodo statico – metodo dinamico

Rispetto a Franciacorta, è stato possibile raccogliere un buon numero di dati per effettuare un confronto tra i metodi, confortati pure da una buona attendibilità delle misure, effettuate in una zona schermata rispetto alla pista. Il confronto ha mostrato, a grandi linee, una buona correlazione tra i due metodi descritta dalla linea di tendenza in Fig.13; tuttavia, il risultato ottenuto non è valido in maniera assoluta, considerando che, come evidenziato nel grafico, è possibile che due moto caratterizzate dallo stesso valore della statica presentino un valore in dinamica nettamente differente.
Nell'ultimo test effettuato a Misano, ovvero la correlazione giri motore-valore fonometrico della statica per una Yamaha R6, i rilievi fonometrici hanno mostrato una naturale crescita del livello sonoro all'aumentare dei giri motore (Fig.14). Da sottolineare che a 6000 giri si ha un lieve decremento del livello sonoro, forse dettato da un assetto specifico della moto per quanto riguarda le emissioni sonore.

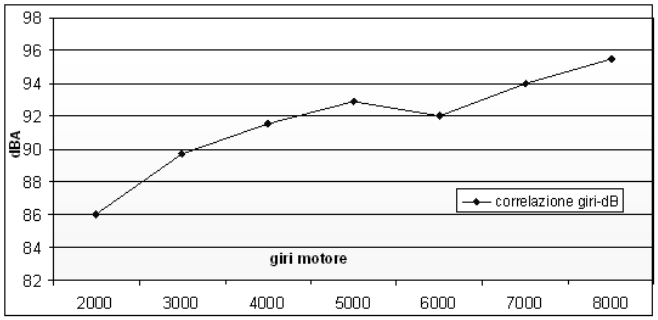


Figura 14: Andamento statica in funzione dei giri (Yamaha R6)

I dati raccolti dalle centraline di monitoraggio acustico hanno anche permesso di effettuare un'analisi sull'impatto acustico nel territorio circostante la pista. In particolare, si è voluto focalizzare l'attenzione sul confronto tra i valori medi globali delle statiche dei gruppi di moto rilevati (R-Series e Sportive) e l'impatto acustico prodotto sul territorio circostante dalle attività in pista di ciascuno dei due gruppi, che hanno girato in orari differenti. I valori mostrano un risultato pressoché analogo per i due gruppi, già caratterizzati da valori globali delle statiche simili, tuttavia tale risultato non può essere considerato pienamente valido se si considera che i dati rilevati con le centraline sono stati influenzati da fattori esterni non direttamente imputabili all'attività in pista e che il numero di moto rilevate col metodo statico è stato troppo differente tra i due gruppi (5 R-Series e 27 Sportive) perché se ne possa ritenere valido il confronto.

ANALISI DEI TEST FONOMETRICI: LIMITI DEL TEST DINAMICO

I rilievi fonometrici eseguiti nei test di Misano e Franciacorta hanno avuto lo scopo di valutare la validità del metodo "dinamico" e di confrontare i dati rilevati sulle moto col relativo impatto sul territorio.

Quanto eseguito nei test e definito in base ai risultati ottenuti, si può riepilogare come segue:

- eseguite misurazioni livelli statica su circa 120 moto complessive;
- livelli della statica nella norma (102 dBA) con dB killer;
- definito il rapporto tra livello della statica ed impatto sul territorio;
- l'impatto sul territorio mostra livelli direttamente lineari alla diversa statica, causa l'uniformità delle moto e lo spettro in frequenza esente da componenti in bassa frequenza;
- livelli della statica pari od inferiori a 100 dBA permettono il rispetto delle normative acustiche (DPR 304/2001) sia al sedime pista che ai ricettori (salvo specifiche situazioni critiche);
- analizzati i componenti sonori delle varie parti della moto come singoli contributi allo scopo di definire dove intervenire per la riduzione globale del livello acustico;
- i comportamenti di alcune moto, evidenziano la necessità del coinvolgimento delle case costruttrici, poiché non è sufficiente agire sui silenziatori scarico gas;
- eseguite misurazioni livelli dinamica su 11 moto;
- definita una correlazione lineare tra statica e dinamica;
- stesso valore della statica può dare diversa dinamica per effetto della predominanza del contributo meccanico e dell'aspirazione;
- i vari test di dinamica, confermano la complessità delle rilevazioni, incompatibili con le situazioni in pista connesse alle gare.

Tali risultati mostrano sostanziali limiti del metodo dinamico nel determinare le emissioni acustiche delle moto e nel sostituire la fonometrica statica come metodo in base al quale discriminare l'entrata in pista delle moto nelle competizioni.

In particolare, il metodo risulta avere troppi limiti nella sua applicabilità, soprattutto perché deve essere effettuato in una zona schermata dalle attività in pista; inoltre, al di là del tempo necessario all'esecuzione, a volte risulta scarsamente definibile la reale sorgente di rumore della moto (scarico o meccanica), pertanto non risulterebbe sufficiente intervenire sul semplice scarico della moto con l'inserimento dei dBkiller. I dati ottenuti nelle due sessioni di Franciacorta e Misano hanno suggerito alla Federazione Motociclistica Internazionale di abbandonare a fine 2008 l'introduzione di tale metodo, perseguendo una strada diversa ed analoga alla classica fonometrica statica (in questo periodo si sta mettendo a punto il metodo "2mMax", basato su una semplice sgassata della moto).

CONCLUSIONI

Nelle due sessioni di prove fonometriche di Franciacorta e Misano sono state condotte analisi fonometriche con l'obiettivo di approfondire la problematica delle emissioni rumorose delle moto durante la normale attività in pista, disciplina per la quale non è disponibile una serie di dati acustici significativi.

Il tavolo di lavoro attivato dalla Federazione Motociclistica Italiana ha coinvolto i principali enti tecnici e gestori di autodromi interessati.

In particolare, in tali sessioni fonometriche, si è cercato di testare un nuovo metodo, basato sulla dinamica della moto, col quale si potesse individuare una soluzione univoca nel determinare le emissioni sonore di una moto, onde autorizzarne l'ingresso in pista nelle competizioni internazionali, una volta definito un limite di ammissione.

Il metodo dinamico, testato su 11 moto tra Franciacorta e Misano, ha mostrato evidenti limiti, legati sia alla fattibilità della misura, che richiede un zona schermata rispetto alla pista, ma necessariamente all'interno del sedime dell'autodromo, sia all'attendibilità del valore rilevato,

condizionato, oltre che da fattori ambientali, anche dalla modalità con cui avviene l'accelerazione della moto, fin troppo soggettiva.

I dati raccolti a Franciacorta e Misano hanno permesso di avviare un confronto con la Federazione Internazionale sulle problematiche e l'incertezza di questo metodo, che è stato abbandonato a fine 2008; l'attività sul mondo della velocità in pista ha permesso di raccogliere una notevole banca dati sulle emissioni delle singole moto, non disponibile prima.

Le attività che lo studio BIONOISE sta portando avanti con la Federazione Motociclistica Italiana, di concerto con la Federazione Internazionale, mirano a migliorare l'impatto acustico che le attività delle moto hanno sui territori circostanti le piste, senza dover necessariamente penalizzare chi dedica tempo e passione ad uno sport molto seguito.

Tutta l'attività di FMI nel settore rumore da attività motoristica, ha avuto origine dalla passione e dedizione del compianto Dr. Alberto Morresi, vicepresidente FMI e presidente del settore tecnico FMI, scomparso prematuramente a fine 2008; questo lavoro vuole essere un omaggio alla sua memoria in ricordo della competenza, passione e simpatia di un grande amico.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. FMI, Regolamento Velocità 2008
2. Internoise 2008, Motocross racing tracks noise evaluation. New linear source model application. *Strani G., Luci C.* Shanghai 2008.

RAPPRESENTAZIONE DELLA SITUAZIONE ACUSTICA DEL TERRITORIO MEDIANTE INDICI SINTETICI DI CRITICITA'

Daniele Sepulcri [1], Francesca Remigi [1], Fabio Zulato[1]

[1] ARPAV – Dipartimento Provinciale di Venezia, via Lissa 6 – 30173 Mestre-Venezia

SOMMARIO

Il Decreto Legislativo 194/05, di recepimento della normativa comunitaria, assegna un ruolo fondamentale alla partecipazione del pubblico alle fasi di ricognizione dello stato di fatto e di pianificazione degli interventi di gestione dell'inquinamento acustico. Ciò comporta la necessità di elaborare modalità di presentazione dello stato di fatto che consentano una rapida visualizzazione della situazione anche a personale non specialistico. Nel presente lavoro si illustrano alcuni tentativi di caratterizzare lo stato acustico del territorio, a livello di agglomerato urbano, mediante l'elaborazione e la rappresentazione su base cartografica di indici sintetici di criticità che tengano conto sia dei risultati della mappatura acustica in termini di livelli sonori, sia dell'effettivo impatto di tali livelli in relazione alle diverse modalità di fruizione del territorio, con lo scopo di facilitare la comprensione dell'incidenza di questa forma di inquinamento, al fine sia di orientare le scelte politico-amministrative, sia di consentire una effettiva informazione e partecipazione del pubblico.

INTRODUZIONE

Il recepimento della Direttiva Europea 2002/49/CE [1], mediante il Decreto Legislativo del 19 Agosto 2005, n. 194 [2], introduce all'interno del nostro quadro normativo l'obbligo di informazione del pubblico, sia durante le fasi di ricognizione dello stato di fatto sia nella fase di pianificazione degli interventi di gestione dell'inquinamento acustico.

Tuttavia la legge non fornisce indicazioni precise su quali debbano essere i requisiti minimi di informazione e le procedure di consultazione.

Risulta perciò di fondamentale importanza saper scegliere, all'interno del materiale di cui si dispone, i contenuti tecnici di più agevole comprensione e di maggiore interesse sia per orientare le scelte politico amministrative sia per consentire un effettiva partecipazione dei cittadini.

Nell'ambito dell'incarico conferito ad ARPAV dal Comune di Venezia per la predisposizione del Piano Comunale di Risanamento Acustico, a conclusione della fase di mappatura acustica, si è presentata l'esigenza di fornire una base informativa facilmente consultabile e comprensibile, non solo sui livelli acustici, ma sull'effettivo impatto che tali livelli comportano sulla vita e le attività umane, fruibili per l'informazione alla popolazione, ma anche a livello politico per orientare le successive scelte.

QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

Il quadro normativo di riferimento in materia di inquinamento acustico ambientale è costituito dalla Legge Quadro 447 del 26/10/95 [3] e relativi disposti attuativi, e dal D.Lgs. 194 del 19/08/2005, il quale recepisce la Direttiva Europea 2002/49/CE del 25/06/2002 relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale.

La Legge Quadro, stabilisce che i piani di risanamento acustico debbano contenere l'indicazione delle priorità di intervento ma non ne fornisce di fatto criteri di quantificazione.

Il D.M. del 29/11/00 [4] prevede che le società e gli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto e delle relative infrastrutture debbano individuare le porzioni di territorio in cui il rumore prodotto determina il superamento dei limiti di legge.

Il decreto individua fasi e tempi di attuazione dei piani, e stabilisce i criteri per l'attuazione degli interventi di risanamento, direttamente sulla sorgente rumorosa, lungo la via di propagazione del rumore dalla sorgente al ricettore e direttamente sul ricettore. L'ordine di priorità degli interventi è stabilito sulla base del valore numerico di uno specifico indice di priorità "P", la cui procedura di calcolo è descritta nell'Allegato 1 del decreto.

Il D.Lgs. 194/05, infine, prevede la predisposizione di mappature acustiche e di piani di azione relativamente per le infrastrutture di trasporto principali e per glli agglomerati urbani. La finalità di questi strumenti è di evitare, prevenire o ridurre gli effetti nocivi dell'esposizione al rumore ambientale, compreso il fastidio, assicurando l'informazione e la partecipazione del pubblico.

Il Decreto, pur fornendo contenuti relativi al concetto di priorità, funzionale all'entità della popolazione esposta, non stabilisce criteri quantitativi per la sua individuazione.

LA MAPPATURA STRATEGICA COME SUPPORTO ALLE POLITICHE LOCALI

Nell' ottobre del 2006, l' European Commission Working Group, ha organizzato il workshop: "Presenting Noise Mapping Information to the Public", con lo scopo di favorire

un dibattito sul modo migliore di presentare i dati di mappatura acustica al pubblico e ad altri soggetti, al fine di informarli fin dall'inizio del processo di sviluppo dei piani d'azione.

Le tematiche sviluppate all'interno del workshop sono contenute nel documento WG-AEN 003 2007 Final Draft Position Paper. [5]

Il WG-AEN ha sottolineato più volte all'interno del documento che i risultati della mappatura acustica strategica devono essere utilizzati per coinvolgere il pubblico come attore principale nel successivo processo di sviluppo dei piani d'azione, e che le informazioni fornite devono essere comprensibili a tutti i cittadini.

Inoltre le mappe acustiche strategiche possono servire a supportare politiche locali di limitazione dell'aumento del rumore sul territorio.

E' perciò necessario costruire degli indicatori generali o dei codici grafici che permettano il raffronto o l'incrocio di dati associati ai diversi fattori ambientali che contribuiscono a determinare la pressione ambientale e le situazioni di attuale o potenziale criticità.

Mediante la costruzione di tali indici è quindi possibile una rapida ricognizione dello stato acustico del territorio mettendo in evidenza le zone sensibili e di maggiore impatto, informazioni che servono come base per la pianificazione e la gestione dello sviluppo urbano ed in particolare dei sistemi di trasporto.

Tuttavia, spetta agli Stati membri decidere il tipo e il livello di dettaglio della mappatura e la spiegazione del significato delle informazioni.

Nel caso specifico, in mancanza di più precise indicazioni a livello nazionale, si è cercato di costruire una rappresentazione cartografica dello stato di sofferenza acustica del territorio, elaborando un indice di criticità georeferenziato, determinato sulla base dei risultati della mappatura acustica. Per l'individuazione dell'algoritmo da utilizzare per il calcolo dell'indice si è fatto riferimento a quanto reperibile nella normativa vigente e nella documentazione tecnica disponibile e nella letteratura scientifica, relativamente alla elaborazione di indici per l'individuazione delle priorità di intervento nei piani di risanamento acustico e nei piani di azione.

SCELTA DELL'ALGORITMO PER IL CALCOLO DELL'INDICE DI CRITICITA'

In generale si utilizzano per l'attribuzione di punteggi di priorità le seguenti tipologie di criterio [6]:

1. criteri di gravità: privilegiano gli interventi da effettuarsi nelle aree dove gli effetti di inquinamento acustico sono più gravi;
2. criteri di efficienza: privilegiano gli interventi dove a parità di risorse impiegate si ottengono i risanamenti più estesi;
3. criteri di efficacia: privilegiano gli interventi che conseguono la più ampia soluzione delle criticità evidenziate: si esprimono in generale come percentuale di situazione risolte rispetto al numero di quelle evidenziate o come rapporto fra la gravità residua della situazione dopo l'intervento e quella precedente.

Considerato che uno dei principali obiettivi è la rappresentazione della situazione di sofferenza acustica del territorio, a scopo prevalentemente informativo, l'algoritmo da utilizzare è stato scelto fra quelli per il calcolo di indici di gravità.

La costruzione di un indice di gravità deve tenere in considerazione l'effettivo livello sonoro e l'entità del superamento rispetto a definiti valori di riferimento; inoltre deve tener conto dell'effettivo impatto del livello sonoro in termini di esposizione della popolazione, eventualmente differenziata fra ricettori di diversa vulnerabilità.

L'unico indice di gravità attualmente normato a livello nazionale è quello introdotto dal DM 29/11/2000 per la definizione delle priorità di intervento nei piani di contenimento ed abbattimento del rumore delle infrastrutture di trasporto. L'algoritmo per il calcolo di questo indice, con riferimento ad una determinata porzione di territorio, è sostanzialmente dato dalla sommatoria dei prodotti fra l'entità in dB del superamento del limite acustico pertinente ed il numero di persone (residenti) esposte al livello acustico considerato. E' prevista una pesatura per il numero di persone esposte in funzione della maggiore vulnerabilità di alcune tipologie di ricettori. E' previsto che il calcolo sia eseguito solo in facciata ad edifici e solo gli edifici residenziali, oltre agli edifici scolastici, ospedali, case di cura e di riposo devono essere inclusi.

Considerato che l'algoritmo proposto dal DM 29/11/2000, consente di tener conto degli elementi più rilevanti che determinano l'effettiva gravità dell'impatto del rumore su un'area, e che comunque la norma citata costituisce riferimento a cui anche nei piani di risanamento le amministrazioni si devono attenere, si è ritenuto di considerare valido questo algoritmo, opportunamente adattato, anche per la costruzione delle mappe di criticità.

COSTRUZIONE DEGLI INDICI DI CRITICITA' ACUSTICA

Indice di criticità residenziale

La procedura di calcolo dell'indice di priorità prevista dal DM 29/11/2000 tiene conto delle situazioni di esposizione residenziale o relativa a ricettori sensibili (scuole, strutture di cura e ricovero), a rumori provenienti dall'esterno, ed è pertanto utilizzabile in modo efficace per costruire una mappa di criticità acustica residenziale [7].

Per la costruzione della mappa si è suddiviso l'intero territorio comunale in celle di forma quadrata di lato 25 m; in ciascuna cella si è proceduto al calcolo dell'indice di priorità P facendo riferimento all'algoritmo del DM 29/11/2000. Nella procedura di calcolo dell'indice "P" il DM 29/11/2000 introduce alcune semplificazioni, che si rendono necessarie nell'ipotesi che non si disponga di una mappatura acustica sufficientemente dettagliata da permettere di conoscere la distribuzione dei livelli sonori sull'intero perimetro degli edifici, e che non si abbiano a disposizione dati dettagliati sul numero di residenti associati ai singoli edifici e ci si debba ricondurre, di conseguenza, ad un indice demografico generalizzato.

Disponendo in questo caso di tutte le informazioni di dettaglio necessarie è stato possibile, ottenere una determinazione dell'indice di priorità previsto dal DM con un metodo molto più preciso.

L'indice "P" è stato calcolato con la formula seguente:

$$P = \sum_i [C_i(N_{r,i} / n_{p,i}) \sum_j [\theta (L_{ij} - L_{ij}^*)](L_{ij} - L_{ij}^*)] \quad (1)$$

dove :

- C_i è il fattore di peso assegnato all'i-esimo edificio (pari a 1 per edifici residenziali; 3 per edifici scolastici per il periodo di riferimento diurno; 0 per edifici scolastici per il periodo di riferimento notturno; 4 per ospedali, case di cura e case di riposo;)
- $N_{r,i}$ è il numero di persone residenti (o, secondo i casi, di posti letto o di alunni) dell'i-esimo edificio;
- $n_{p,i}$ è il numero di punti di calcolo del livello sonoro in facciata dell'i-esimo edificio;
- θ (x) è la funzione di Heaviside, che assume valore 0 per $x<0$ e 1 per $x \geq 0$;
- L_{ij} è il valore del livello sonoro valutato nel j-esimo punto di calcolo in facciata all'i-esimo edificio;
- L_{ij}* è il limite acustico pertinente applicabile nel j-esimo punto di calcolo in facciata all'i-esimo edificio.

Al fine di rappresentare l'effettiva reale situazione di esposizione al rumore, quali livelli sonori in facciata agli edifici sono stati considerati i livelli sonori complessivi, in termini di $L_{Aeq,TR}$, determinati dall'insieme di tutte le sorgenti sonore incluse nella mappatura acustica. Per quanto riguarda i valori di riferimento con cui confrontare i livelli acustici, si è ritenuto opportuno considerare due diverse rappresentazioni. La prima riferita ai valori di qualità di cui alla Tabella D del DPCM 14/11/97, si tratta infatti di valori obiettivo che dovrebbero essere conseguiti indipendentemente dalle sorgenti coinvolte e quindi valori rappresentativi di una situazione ottimale, con riferimento alle diverse modalità di utilizzo del territorio. La seconda rappresentazione è stata invece prodotta utilizzando come valore di riferimento una quantità fissa (coincidente con i limiti di zona validi per la classe I). Questa rappresentazione consente di dar conto in modo più adeguato dell'effettivo disagio cui è esposta la popolazione residente, considerato che l'impatto del rumore sul benessere e la salute delle persone è determinato dai livelli sonori e non dalla classificazione urbanistica dell'area.

Il calcolo dell'indice P in ciascuna cella ha consentito di costruire mappe di criticità, diurne e notturne, assegnando diversa colorazione alle celle, a seconda del valore del rispettivo indice, e quindi di creare mappe di criticità.

Un esempio di mappa di criticità acustica residenziale è illustrato in Figura 1.

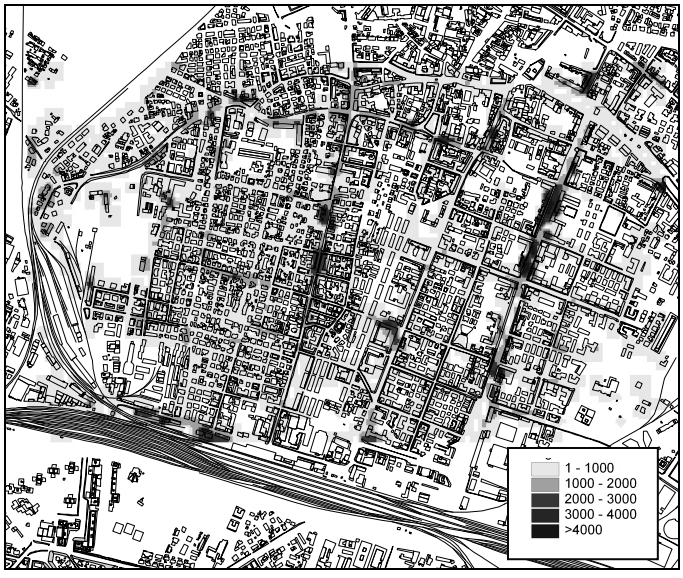


Figura 1 - Mappa Indice di Criticità Acustica Residenziale riferito ai valori di Qualità - Mestre Centro, periodo di riferimento notturno.

Costruzione dell'indice di criticità per l'esposizione a rumore in ambiente esterno.

L'indice di criticità residenziale così calcolato è in grado di rappresentare solo una parte del disagio causato dall'inquinamento acustico, in quanto, oltre a non considerare le situazioni di esposizione che si possono verificare in edifici non residenziali, quali ad esempio uffici e strutture ricettive, non dà alcun peso alle situazioni di superamento dei valori di riferimento in aree esterne fruibili alla popolazione quali giardini, parchi pubblici, percorsi pedonali, che nell'insieme costituiscono ambiente di vita per la popolazione.

Per ovviare a questo problema si è ritenuto opportuno affiancare all'indice di criticità residenziale un indice di criticità per l'ambiente esterno, per la determinazione del quale si è operato nel modo di seguito descritto.

Dalla superficie totale emersa del Comune di Venezia, si sono sottratte mediante l'utilizzo di un programma Gis (ArcGis 9.2), le superfici occupate dagli edifici, gli specchi acquei e le aree occupate dai fiumi, le aree agricole, le aree produttive e industriali, il sedime stradale, ferroviario, aeroportuale e portuale, ovvero tutte quelle aree che oggettivamente non sono utilizzabili per la permanenza di persone all'esterno.

Si è considerato il territorio comunale suddiviso in tre macroaree di caratteristiche omogenee (Terraferma, Centro Storico e Isole, Lido di Venezia e Pellestrina) e per ciascuna di esse è stata calcolata la concentrazione media di popolazione all'aperto in persone/m^2 (nell'ipotesi che tutti i residenti si trovino contemporaneamente all'aperto), suddividendo il numero dei residenti per la superficie rimanente dopo la sottrazione delle aree non fruibili. I risultati di questa operazione sono riportati in tabella 1.

Tabella 1: Popolazione Residente, Superficie e concentrazione di popolazione all'esterno

Zona	Terraferma	Centro Storico e Isole	Lido e Pellestrina
Numero di residenti	176027	73293	22340
Superficie m^2	89990896	13265700	7937780
Persone per m^2 all'esterno	0.001956	0.005525	0.002814

Si è inoltre considerato che effettivamente solo una frazione del tempo è trascorsa all'esterno dai residenti e si è quindi moltiplicato il dato di concentrazione per un fattore di occupazione C_c pari a 0,125 per il periodo diurno e 0,065 per il periodo notturno (corrispondente ad un tempo medio trascorso all'esterno rispettivamente di 2 ore e di 30 minuti).

Come nel caso dell'indice di criticità residenziale, il territorio è stato suddiviso in celle di forma quadrata, in questo caso di lato 50 metri. Per ogni cella è stata definita una griglia avente passo 10 x 10, ottenendo così sottocelle di lato 5 metri, per ognuna delle quali si è calcolato il termine Pi mediante le seguente formule:

$$P=\sum_i Ri(L-L_0) \quad (2)$$

con

$$Ri = Cc \times S_i \quad (3)$$

dove:

- R_i rappresenta il numero ipotetico di persone presenti in corrispondenza del punto i-esimo;
- S_i è l'area della sottocella di 5m x 5m, dalla quale vengono sottratte tutte le porzioni appartenenti ad aree non fruibili;
- L_{0i} è il valore acustico di riferimento applicabile nel punto i-esimo.

In questo modo, a ciascuna cella viene assegnato un valore dell'indice di criticità e ciò permette di costruire una mappa analoga a quella realizzata per la criticità residenziale.

Anche in questo caso sono state prodotte mappe riferite ai valori di qualità e mappe riferite ad un valore di riferimento costante, e differenziate per periodo diurno e notturno.

Un esempio di queste mappe è riportato in Figura 2.

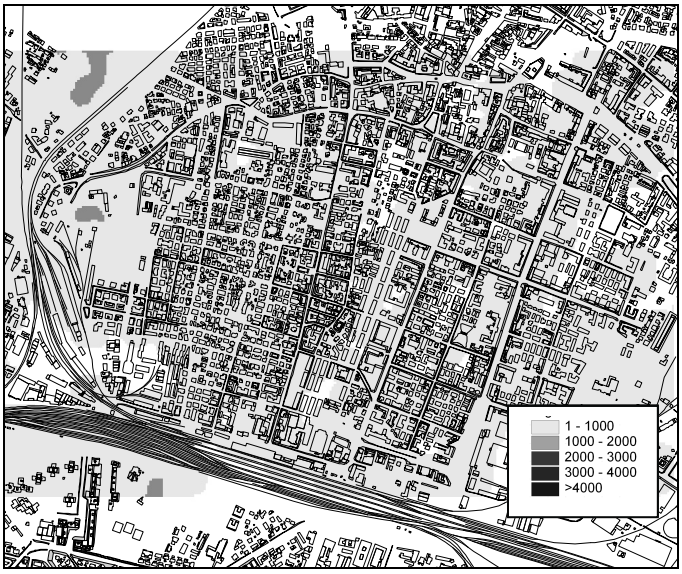


Figura 2 - Mappa Indice di Criticità Acustica in Ambito Esterno riferito ai valori di Qualità - Mestre Centro, periodo di riferimento diurno.

CONCLUSIONI

Il miglioramento dell'ambiente urbano richiede un efficace coordinamento tra politiche di settore e l'integrazione dei problemi ambientali nella pianificazione e nella gestione del territorio. Il rumore rappresenta uno dei fattori di maggior peso del degrado ambientale delle aree urbane.

Nel presente lavoro si sono illustrate alcune soluzioni per la rappresentazioni dello stato acustico del territorio che tengono conto sia della distribuzione spaziale dei livelli sonori che dei fattori di vulnerabilità dell'ambiente, con lo scopo di promuovere una motivata ed equilibrata consapevolezza del rumore ambientale come fattore che contribuisce alla qualità della vita.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Direttiva 2002/49/CE, Determinazione e gestione del rumore ambientale.
2. Decreto Legislativo del 19 Agosto 2005, n. 194, "Attuazione della Direttiva 2002/49/CE relative alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale".
3. Legge 26 Ottobre 1995, n. 447, Legge quadro sull'inquinamento acustico.
4. D.M 29 Novembre 2000, Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore.
5. European Commission Working Group WG-AEN- Presenting Noise Mapping Information to the Public.
6. UNI/TR 11327, Criteri per la predisposizione dei piani d'azione destinati a gestire i problemi di inquinamento acustico ed i relativi effetti.
7. D. Sepulcri, F. Remigi, A. Buoso, M. Piovesan, A. Scarpa – Mappatura del Rumore Ambientale e Piano di Risanamento Acustico: il caso di Venezia – 1° Convegno Gra – Ischia – 2009.

RUMORE PRODOTTO DA IMPIANTI EOLICI: ESPERIENZE DI MISURA

S. Curcuruto[1], D. Atzori[1], R. Betti[1], E. Lanciotti[1], G. Marsico[1], F. Sacchetti[1], R. Silvaggio[1]

[1]ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma

SOMMARIO

Allo stato attuale in Italia non sono disponibili specifici riferimenti legislativi dedicati alla tematica del rumore prodotto dagli impianti eolici. Tale assenza genera diverse incertezze nell'interpretazione della normativa vigente, in particolare per quanto attiene all'applicazione del criterio differenziale e alle procedure di misura. In relazione a queste ultime, infatti, la normativa prescrive di effettuare i rilievi con velocità del vento inferiore a 5 m/s in corrispondenza del microfono, mentre i generatori eolici producono il massimo impatto acustico in presenza di valori di velocità ben più elevati. E' possibile inoltre riscontrare criticità tra i livelli acustici rilevati e i limiti di zona, in quanto i siti in questione spesso risultano ubicati in aree maggiormente tutelate.

A fronte dell'esigenza di una chiara interpretazione della normativa vigente e in attesa di una futura revisione della stessa, ISPRA ha avviato un progetto finalizzato alla definizione di criteri legislativi dedicati alla sorgente specifica. Tale attività ha avuto inizio con una campagna di misure effettuata per caratterizzare sia il livello del rumore ambientale sia la specificità della sorgente, allo scopo di valutarne l'impatto sul territorio.

1. INTRODUZIONE

Ai fini della tutela dell'ambiente dal rumore prodotto dall'esercizio dei generatori eolici, il riferimento è costituito dalla Legge Quadro n. 447/95 e successivi decreti attuativi; tale assetto normativo non contiene però specifiche indicazioni dedicate alla tematica del rumore prodotto dai suddetti impianti, generando diverse incertezze in merito alla corretta interpretazione della normativa vigente.

La Legge Quadro n. 447/95, infatti, individua i valori limite che devono essere rispettati per le sorgenti fisse, quindi anche per gli aerogeneratori, che sono distinti in valore limite assoluto di immissione, valore limite assoluto di emissione e valore differenziale. Le modalità di rilevamento e misurazione dell'inquinamento acustico sono poi stabilite dal DM 16 marzo 1998 che, all'allegato B, nell'indicare le norme tecniche per l'esecuzione delle misure, prevede che quelle in esterno siano effettuate con velocità del vento inferiore a 5 m/s.

La specifiche di funzionamento degli impianti di generazione eolica, soprattutto di quelli di grossa taglia, prevedono che questi entrino in funzione con velocità del vento superiori al valore massimo consentito di 5 m/s, al di sopra del quale le misure non possono considerarsi valide, sia da un punto di vista formale di rispetto della norma, che da un punto di vista tecnico, visto il contributo non più trascurabile dovuto alla presenza del vento. Un'altra problematica è quella legata al tempo di misura, andrebbe infatti specificato il tempo minimo di misura necessario per la corretta caratterizzazione della sorgente. E' possibile inoltre riscontrare criticità tra i livelli acustici rilevati e i limiti di zona, in quanto i siti in questione spesso risultano ubicati nelle aree a maggiore tutela.

A fronte dell'esigenza di una chiara interpretazione della normativa vigente e in attesa di una futura revisione della stessa, ISPRA ha avviato un progetto finalizzato alla definizione di possibili criteri legislativi dedicati alla sorgente specifica. Tale attività ha avuto inizio con una campagna di misure effettuata per caratterizzare sia il livello del rumore ambientale, sia la specificità della sorgente, allo scopo di valutarne l'impatto sul territorio.

2. LA CAMPAGNA DI MONITORAGGIO

Il gruppo di lavoro ISPRA ha effettuato, nei giorni 6-8 aprile 2009, una campagna di monitoraggio del rumore prodotto dalle due principali tipologie di impianti eolici tra quelle presenti sul territorio nazionale. In particolare, il primo giorno, le misure acustiche hanno interessato il parco eolico sito presso la località di Lacedonia (AV); nei successivi due giorni, il monitoraggio ha interessato il sito di Sant'Agata di Puglia (FG). Le turbine eoliche del sito di Lacedonia, del tipo V90 tripala, presentano sostegno tubolare; le turbine presenti nel sito di Sant'Agata di Puglia, del tipo V44 tripala, sono installate su sostegno a traliccio. Nella tabella seguente (Tabella 1) sono riportate le caratteristiche tecniche delle due tipologie.

Tabella 1: Caratteristiche tecniche degli aerogeneratori.

	V90	V44
Altezza dal suolo dell'HUB (m)	80	50
Lunghezza della pala (m)	45	22
Velocità di *cut-in* all'HUB (m/s)	3,5	4,5
Velocità di *cut-off* all'HUB(m/s)	25	26
Velocità alla potenza nominale all'HUB (m/s)	12	12
Regime di rotazione (rpm)	18	28
Potenza nominale (MW)	2	0,6

2.1 Sito di Lacedonia (AV)

Nel sito di Lacedonia, i rilievi acustici, in accordo alla norma CEI EN 61400-11[1], sono stati effettuati in n. 4 postazioni, corrispondenti alle direzioni sottovento, sopravento e a 60° rispetto alla direzione del vento, e ad una distanza in pianta pari a 125 m dall'aerogeneratore, così come riportato nella seguente figura.

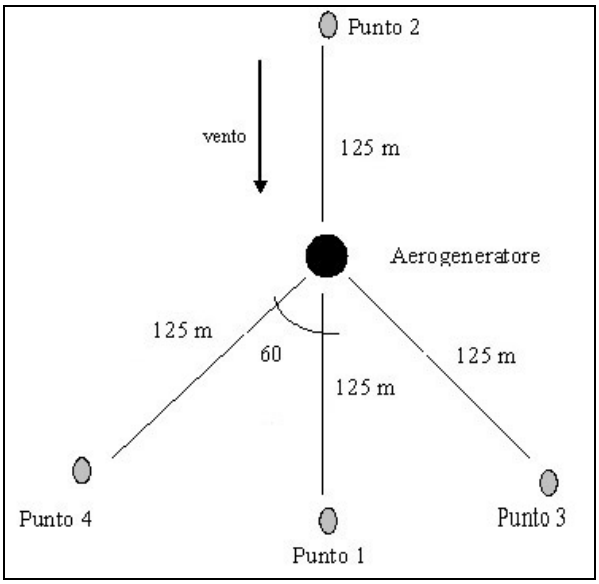


Figura 1: Postazioni di misura.

In corrispondenza del punto di misura 1 (sottovento), i rilevi acustici sono stati effettuati alle altezze di 1,5 m e 4,0 m dal suolo e sono stati acquisiti, ad un'altezza di 1,5 m, anche i dati relativi alla direzione e velocità del vento ogni 1', sempre inferiori a 5 m/s. In tutti gli altri punti, le misure acustiche sono state svolte a 1,5 m dal suolo. Sono state acquisite le grandezze acustiche Leq(A) e i livelli percentili (L_{90}, L_{95} e L_{99}).

È stato considerato trascurabile il contributo dovuto agli altri aerogeneratori, per le significative distanze dai siti di misura.

Il gestore dell'impianto ha fornito i dati relativi al vento (direzione e velocità mediati su 10'), acquisiti nel periodo di misura all'HUB dell'aerogeneratore, che hanno permesso, correlati con i dati misurati mediati sui 10', di calcolare l'esponente del profilo di velocità α, pari a 0,18, della legge esponenziale che descrive l'andamento della velocità del vento in funzione della quota:

$$V(Z_1) = V(Z_2)\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^{\alpha}$$

V= velocità del vento (m/s)
Z_1= 1,5 m
Z_2=80 m

Il valore determinato del parametro α, direttamente proporzionale alla rugosità del suolo, risulta corrispondente alla categoria di terreno di tipo agricolo effettivamente presente. Tale parametro ha permesso di determinare la velocità del vento a 10 m dal suolo, utilizzata quale altezza di riferimento (z_{ref}) per correlare i valori della velocità del vento con i livelli acustici misurati. Nelle figure di seguito riportate la velocità del vento è riferita ad un'altezza di 10 m dal suolo.

Per ciascun valore della velocità del vento misurata ogni 1', è stato determinato il corrispondente valore di Leq(A), depurato degli eventi anomali registrati. Sono stati, quindi, scartati i valori di Leq(A) integrati su intervalli inferiori a 30". La Figura 2 evidenza che la posizione sottovento ha registrato livelli acustici sempre superiori a quelli misurati sopravento, mentre lo scarto tra i valori misurati a 1,5 m e a 4,0 m risulta trascurabile, in quanto le distanze dei due fonometri sottovento rispetto alla posizione dell'HUB dell'aerogeneratore risultano confrontabili.

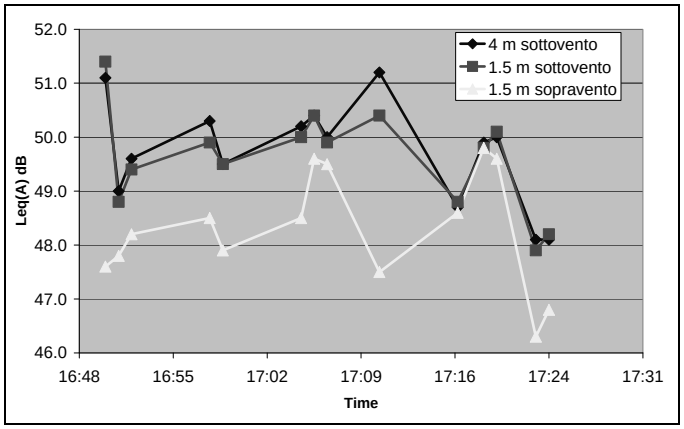


Figura 2: Livelli acustici misurati sopravento (1,5 m dal suolo) e sottovento (1,5 e 4,0 m dal suolo).

Sulla base delle elaborazioni dei valori di vento e di livello sonoro, sono stati raggruppati i valori di Leq(A) secondo le velocità del vento corrispondenti e riscontrate durante il monitoraggio. Per ciascuna classe di velocità del vento è stata calcolata la media logaritmica dei corrispondenti Leq(A) rilevati, così come evidenziato nella Figura 3, nella quale risulta evidente la proporzionalità diretta tra velocità del vento e livelli sonori.

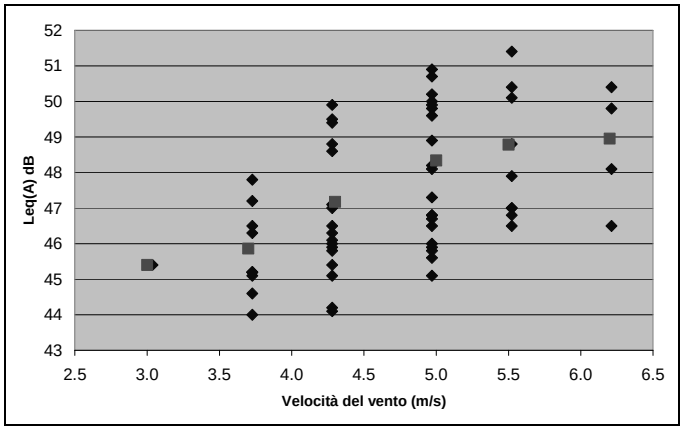


Figura 3: Livelli acustici raggruppati per classi di vento e media logaritmica.

Le prove di regressione lineare e quadratica hanno evidenziato che la regressione lineare presenta una migliore approssimazione dei dati di Leq(A) mediati (Figura 4).

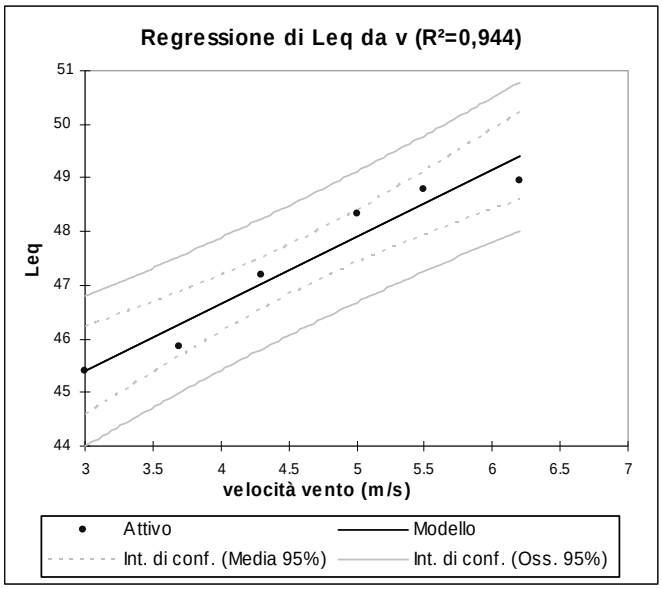


Figura 4: Regressione lineare per classi di vento dei livelli acustici misurati. (R^2: coefficiente di determinazione della regressione lineare; Attivo: medie logaritmiche dei valori misurati per classi di vento; Modello: valori stimati dalle medie logaritmiche dei valori misurati per classi di vento; Int. di conf.: intervalli di confidenza al 95% per i valori osservati e stimati).

A conclusione dell'analisi sul sito di Lacedonia sono riportati i Leq(A) complessivi sul tempo di misura nelle quattro postazioni (Tabella 2).

Tabella 2: Livelli complessivi misurati nelle postazioni di misura.

	Leq dB(A)	$v_{1,5m}$ m/s	v_{10m} m/s	Δ_{P1}* dB(A)
tempo di misura 16:47 - 17:17				
P1	50,0	3,6	5,0	-
P2	48,3			1,7
P3	48,4			1,6
tempo di misura 17:56 - 18:16				
P1	46,0	3,0	4,0	-
P4	45,6			0,4

*differenza dei valori misurati nelle postazioni P2, P3 e P4 rispetto al valore misurato in P1

Nel primo periodo di misura (16:47-17:17) è stata rilevata una velocità media del vento al microfono di 3,6 m/s; mentre nel secondo periodo (17:56 – 18:16) la velocità del vento è risultata mediamente inferiore e pari a 3,0 m/s. Contestualmente, si osserva che le differenze tra i Leq(A) misurati tra la postazione sottovento e le altre sono più marcate nel periodo in cui è stata registrata una velocità media del vento maggiore.

In sintesi, i risultati dei livelli acustici complessivi nei tempi di misura evidenziano quanto segue:

- la postazione sottovento risulta la più critica;
- all'aumentare della velocità del vento crescono le differenze dei livelli sonori rilevabili tra la postazione sottovento e le altre;
- le differenze dei livelli sonori misurati nelle postazioni P2 e P3 sono trascurabili.

2.2 Sito di Sant'Agata di Puglia (FG)

Nel sito di Sant'Agata, i rilievi acustici del 7 aprile sono stati invece effettuati in n.2 postazioni, in corrispondenza della direzioni sottovento e alle distanze dall'aerogeneratore (denominato EE4) di 70 m (postazione n.1) e 140 m (postazione n.2). In entrambe le postazioni di misura i rilevi fonometrici sono stati realizzati a 1,5 m e a 4 m dal suolo.

In corrispondenza della postazione n.1 sono stati acquisiti, ad un'altezza di 4,0 m, anche i dati relativi alla direzione e velocità del vento ogni 1'. Dal grafico riportato (Figura 5), risulta evidente che, durante l'intero periodo di monitoraggio, la velocità del vento rilevata e stimata in corrispondenza delle centraline di monitoraggio sia stata quasi sempre superiore ai 5 m/s.

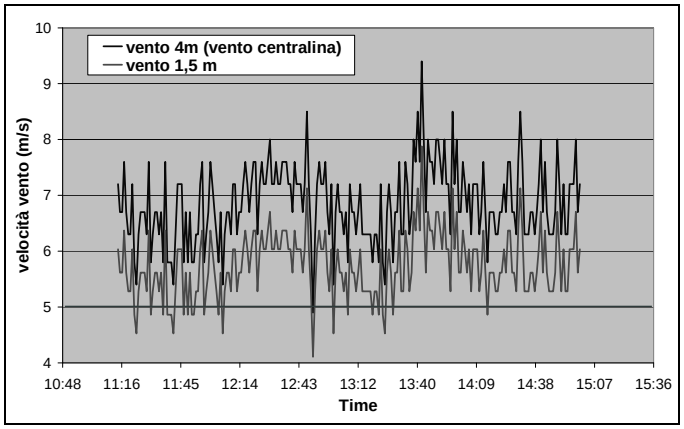


Figura 5: Velocità del vento rilevata a 1,5 m e a 4,0 m.

Nel caso in esame non si può considerare trascurabile il contributo prodotto da un'altra turbina (EE3) posizionata a circa 100 m dall'aerogeneratore EE4; a tal fine, in collaborazione con il gestore dell'impianto, sono state realizzate misure di rumore in tre diverse condizioni: con entrambi gli aerogeneratori funzionanti a regime, con il solo aerogeneratore EE4 funzionante a regime, con entrambi gli aerogeneratori non attivi. Queste ultime misure hanno consentito, insieme alle misure realizzate il giorno 8 aprile in condizioni di calma di vento e quindi di impianto non attivo, di valutare il rumore di fondo del luogo a diverse velocità del vento.

Utilizzando lo stesso parametro α calcolato per il sito di Lacedonia (approssimazione resasi necessaria per la mancanza di altri dati di vento da correlare e ritenuta comunque corretta per l'affinità dei siti di misura), sono stati stimati i dati di velocità del vento all'altezza di riferimento, correlati poi ai livelli sonori misurati.

Dalla figura seguente (Figura 6), risulta evidente quanto poco significativo sia lo scarto tra i valori di rumore misurati a 1,5 m e a 4,0 m nelle stesse postazioni; considerazione avvalorata dall'analisi per classi di vento. (Figura 7).

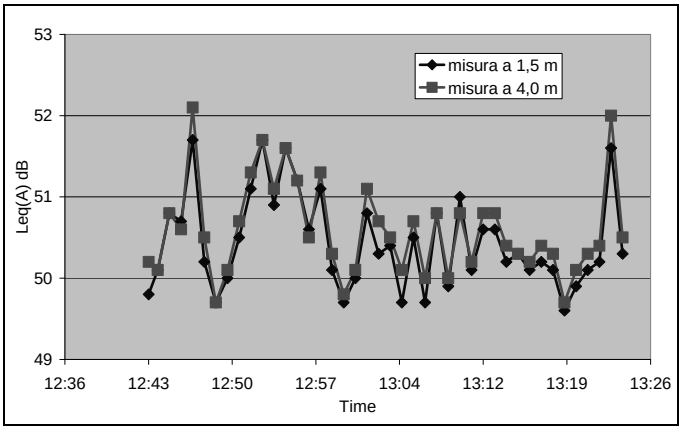


Figura 6: Andamento temporale dei livelli acustici misurati a 1,5 m e a 4,0 m.

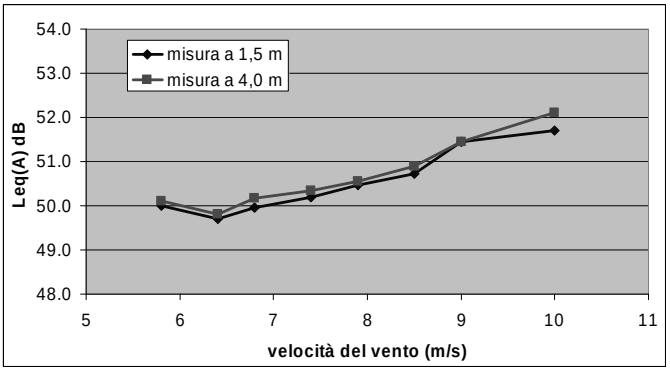


Figura 7: Livelli acustici misurati a 1,5 e a 4,0 m raggruppati per classi di vento.

Dall'analisi effettuata per classi di vento nelle condizioni con entrambi gli aerogeneratori (Figura 8) e con il solo aerogeneratore EE4 in esercizio (Figura 9), è interessante apprezzare la diminuzione di 3 dB(A) al raddoppio della distanza dall'aerogeneratore EE4.

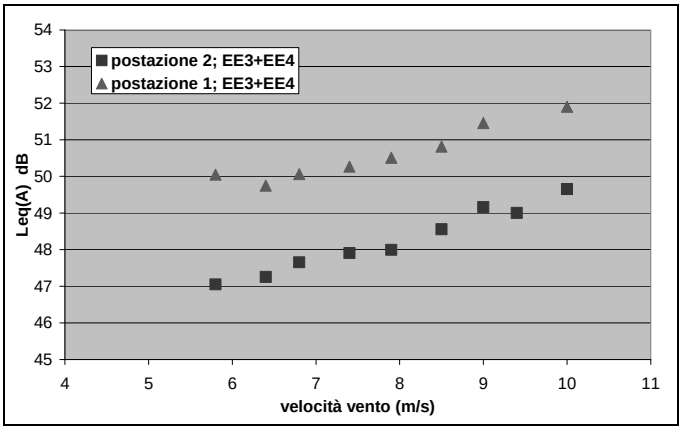


Figura 8: Livelli acustici raggruppati per classi di vento, misurati nelle postazioni P1 e P2 con entrambi gli aerogeneratori attivi.

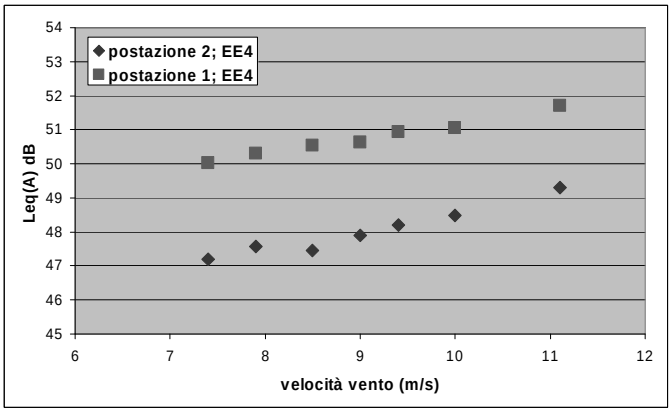


Figura 9: Livelli acustici raggruppati per classi di vento, misurati nelle postazioni P1 e P2 con il solo aerogeneratore EE4 in esercizio.

Anche per il sito di Sant'Agata, la regressione lineare interpola con migliore approssimazione l'andamento delle media logaritmiche dei valori di Leq(A) misurati in funzione della velocità del vento (Figura 10).

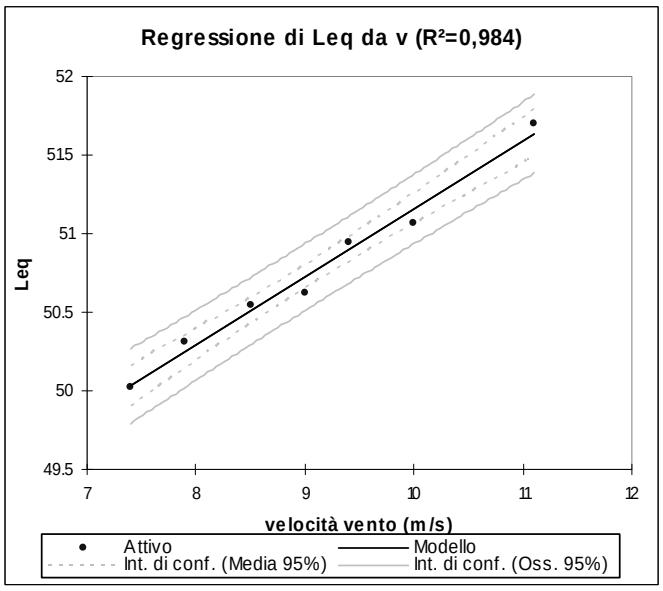


Figura 10: Regressione lineare per classi di vento dei livelli acustici misurati (R^2: coefficiente di determinazione della regressione lineare; Attivo: medie logaritmiche dei valori misurati per classi di vento; Modello: valori stimati dalle medie logaritmiche dei valori misurati per classi di vento; Int. di conf.: intervalli di confidenza al 95% per i valori osservati e stimati).

Considerando sempre valida la regressione lineare al di fuori del campo di velocità indagato in Figura 11, sono stati stimati i livelli acustici in condizioni di *cut in* e di *cut off*, per quest'ultima condizione tale assunzione potrebbe essere troppo conservativa.

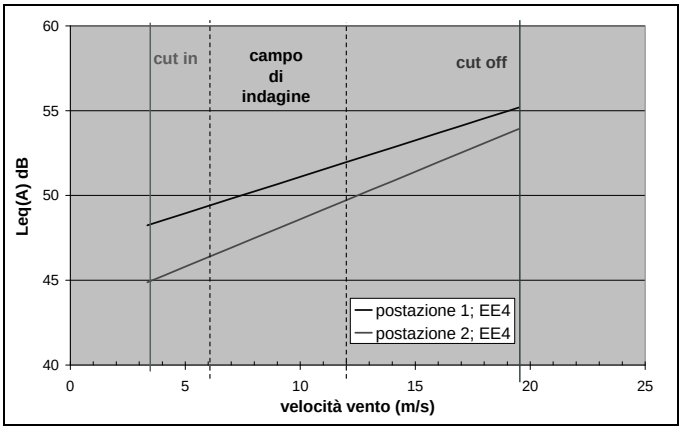


Figura 11: Regressione lineare dei livelli acustici misurati nelle postazioni P1 e P2 ed estrapolazione al di fuori del campo di indagine.

È stata svolta inoltre un'indagine per valutare l'effetto del vento sul rumore rilevabile al microfono. A tal fine, è stato misurato il rumore residuo in condizioni di impianto inattivo a diverse velocità del vento. Con velocità del vento al microfono superiori ai 5 m/s, si nota un aumento del rumore misurato al crescere della velocità del vento (Figura 12); al contrario, per velocità del vento inferiori, non è più apprezzabile alcuna correlazione (Figura 13).

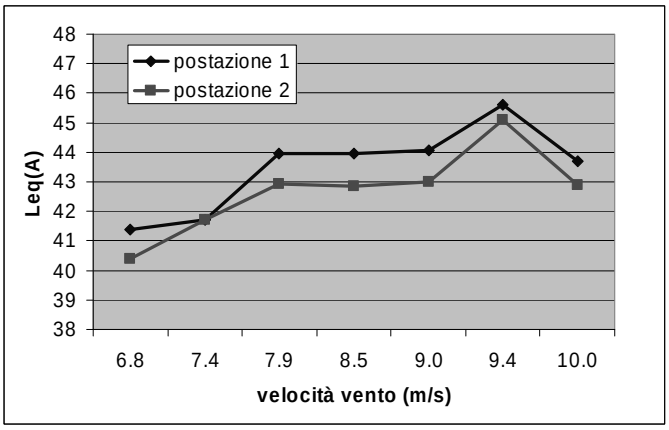


Figura 12: Rumore residuo raggruppato per classi di vento maggiori di 5 m/s

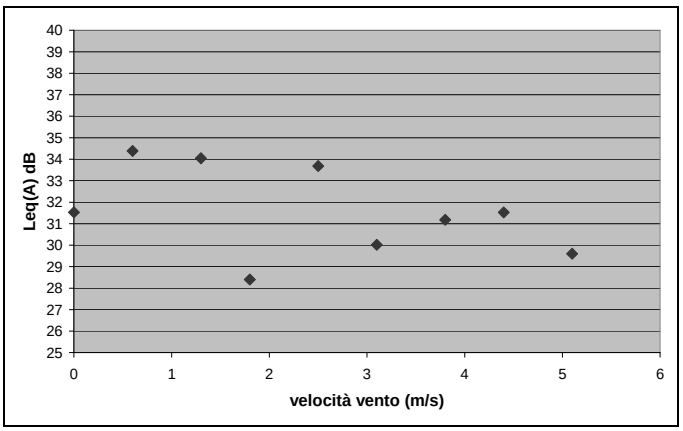


Figura 13: Rumore residuo raggruppato per classi di vento inferiori a 5 m/s.

Ai fini della valutazione dell'emissione di un aerogeneratore e del rispetto del criterio differenziale è necessario conoscere il contributo del rumore dell'aerogeneratore rispetto al rumore residuo. Generalmente, nelle valutazioni di impatto acustico di impianti a ciclo continuo, per i quali non è sempre possibile fermare le lavorazioni, si utilizzano i valori percentili e specificatamente L_{90} e L_{95} per valutare il rumore residuo da scorporare al livello di immissione.

Un'analisi di questo tipo è stata effettuata nel sito di indagine, in entrambe le postazioni di misura: nelle figure successive sono riportati per classi di vento i Leq(A) residui misurati e i livelli percentili L_{90}, L_{95} e L_{99} calcolati dal rumore complessivo misurato e integrato ogni 1'.

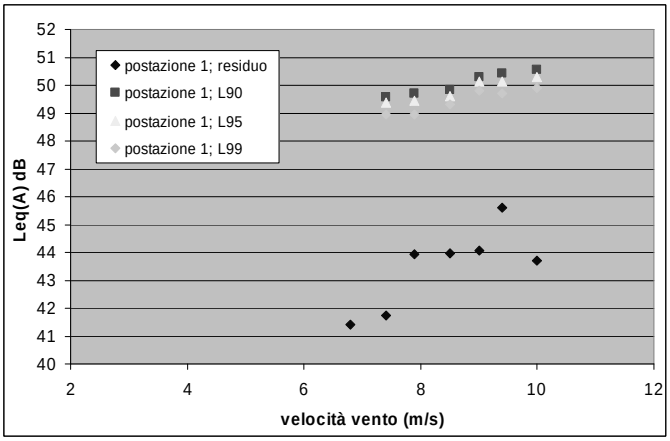


Figura 14: Rumore residuo raggruppato per classi di vento e livelli percentili calcolati dal rumore complessivo misurato e integrato ogni 1' (postazione P1).

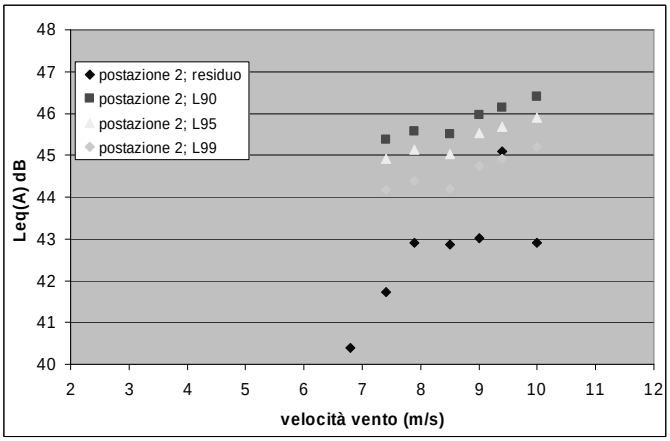


Figura 15: Rumore residuo raggruppato per classi di vento e livelli percentili calcolati dal rumore complessivo misurato e integrato ogni 1' (postazione P2).

Sembra evidente che, per distanze dall'aerogeneratore comparabili alla sua altezza (Figura 14), si apprezza uno scarto importante tra percentili e residuo misurato, che tende a diminuire all'aumentare della distanza della postazione di misura dall'aerogeneratore stesso (Figura 15).

A conclusione dell'analisi sul sito di Sant'Agata, sono riportati i Leq(A) complessivi sul tempo di misura nelle tre condizioni indagate: con entrambi gli aerogeneratori in funzione, con il solo EE4 attivo e con entrambi gli aerogeneratori fermi (Tabella 3).

Tabella 3: Livelli complessivi misurati nelle postazioni di misura.

	Leq dB(A)	V_{4m} m/s	$V_{1,5m}$ m/s	$V_{10\,m}$ m/s	Δ_P* dB(A)	$\Delta_{P1,2}$** dB(A)
EE4+EE3 (tempo di misura 12:43 – 13:11)						
P1 1,5 m	50,5	6,8	5,7	8,0	0,2	-
P1 4,0 m	50,7					-
P2 1,5 m	48,3				0,2	2,2
P2 4,0 m	48,1					2,6
EE4 (tempo di misura 13:36 – 14:05)						
P1 1,5 m	50,7	7,5	6,3	8,8	0,6	-
P1 4,0 m	51,2					-
P2 1,5 m	47,9				0,0	2,8
P2 4,0 m	47,9					3,3
residuo (tempo di misura 14:15 – 14:48)						
P1 1,5 m	41,6	6,8	5,7	8,0	2,1	-
P1 4,0 m	43,5					-
P2 1,5 m	43,6				1,0	2,0
P2 4,0 m	42,6					0,9

* differenze in valore assoluto dei valori misurati nella stessa postazione alle altezze 1,5 m e 4,0 m dal suolo

** differenze in valore assoluto dei valori misurati nelle postazioni P1 e P2 alla stessa altezza

I risultati dei livelli acustici complessivi nei tempi di misura offrono un riscontro all'analisi effettuata per classi di vento:

- le differenze dei livelli misurati a 1,5 m e 4,0 m risultano trascurabili in entrambe le postazioni;
- le differenze dei livelli misurati nelle due postazioni con gli aerogeneratori in esercizio sono pari a circa 3 dB(A).

3. CONCLUSIONI

La campagna di misura realizzata ha evidenziato alcune specificità del rumore generato da impianti eolici che possono rappresentare un punto di partenza di ulteriori indagini per una più attenta interpretazione della normativa vigente, in attesa di una futura revisione della stessa.

È emerso come il contributo del vento al rumore complessivo non possa essere trascurato, soprattutto per venti al microfono superiori ai 5 m/s e nelle condizioni sottovento che risultano le più critiche; all'aumentare della velocità del vento si riscontra infatti una sempre più significativa differenza dei livelli sonori nella postazione sottovento rispetto alle altre postazioni.

Indipendentemente dalla tipologia di aerogeneratore, l'influenza della velocità del vento è evidente anche in un'analisi per classi di vento, che sottolinea una dipendenza lineare tra i livelli sonori misurati e la velocità del vento stessa.

Le misure realizzate confermano, inoltre, per distanze dall'aerogeneratore confrontabili e superiori all'altezza della turbina, una propagazione del rumore di tipo semisferico, con diminuzione di 3 dB(A) al raddoppio della distanza.

È importante, infine, sottolineare che nello studio di impatto acustico di questo tipo di sorgente, in prossimità della stessa i livelli percentili non permettono di valutare il rumore residuo e quindi di stimare il valore di emissione e il differenziale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Norma CEI EN 61400-11, Sistemi di generazione a turbina eolica. Parte 11: Tecniche di misura del rumore acustico, 2004.

FONOISOLAMENTO DI SERRAMENTI IN LEGNO: INFLUENZA DEI COMPONENTI SULLE PRESTAZIONI COMPLESSIVE

G. Moncada Lo Giudice[1], C.Buratti[2], E.Moretti[2], E.Belloni[2]

[1]Università di Roma Sapienza, Dipartimento di Fisica Tecnica, Via Eudossiana, 18, 00184 Roma
[2]CIRIAF, Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici, Università degli Studi di Perugia, Via G. Durati, 67, 06125 Perugia

SOMMARIO

Il rumore aereo esterno si trasmette all'interno di un edificio attraverso le superfici dell'involucro edilizio e trova una via preferenziale di trasmissione attraverso le componenti meno resistenti al passaggio delle onde sonore: in particolare gli infissi e i cassonetti degli avvolgibili influenzano fortemente il valore dell'isolamento acustico della facciata.

Presso il Laboratorio di Acustica della Facoltà di Ingegneria di Perugia sono state testate le proprietà di isolamento acustico di oltre 20 campioni di finestre e portefinestre in legno di uno stesso produttore, dotate anche di cassonetto per avvolgibile. Le prestazioni acustiche degli infissi (R_w) sono state confrontate al variare delle modifiche sui singoli elementi (spessore delle ante, numero di battute, tipo di vetro, presenza o meno di traversa nelle portefinestre, inserimento di cassonetti per avvolgibili, ect.) al fine di individuare l'influenza dei singoli componenti sulle prestazioni globali.

I valori di R_w per i diversi campioni sono compresi tra 38 e 41 dB; i risultati hanno messo in evidenza che la componente che maggiormente influenza il risultato è la tipologia di vetro installato nonché la sezione dell'anta e il numero di battute presenti a parità di vetro. Prestazioni inferiori si osservano in presenza di cassonetti, che in assenza di coibentazione provocano una riduzione di R_w di 4 dB.

1. INTRODUZIONE

L'isolamento acustico di un edificio o di parte di esso deve tener conto del rumore che si trasmette per via aerea proveniente da fonti di rumore interne ed esterne. In particolare, il problema del rumore associato al traffico stradale ha raggiunto una diffusione sul territorio tale da rappresentare una minaccia concreta per la salute dell'uomo. Per garantire all'edificio un efficace isolamento acustico è bene intervenire in fase di progettazione, ponendo particolare attenzione agli elementi più deboli della facciata: i serramenti e i vetri. È necessario, quindi, installare infissi che garantiscano un conveniente isolamento da rumore esterno, soprattutto se l'edificio in questione è particolarmente esposto a rumori da traffico stradale e ferroviario.

Nelle camere riverberanti accoppiate del Laboratorio di Acustica della Facoltà di Ingegneria di Perugia sono stati testati numerosi campioni di infissi in legno di pino massello (finestre e portefinestre); è stato misurato il potere fonoisolante R secondo la norma UNI EN ISO 140-3 [1], l'indice del potere fonoisolante R_w ai sensi della norma UNI EN ISO 717-1 [2] e i termini di adattamento allo spettro C e C_{tr}, al fine di definire le proprietà di isolamento acustico globali dei campioni sottoposti a prova. Sono stati testati due modelli di infisso di uno stesso produttore, che si differenziano essenzialmente per la dimensione dei profili delle ante e del telaio. Apportando modifiche alle singole componenti degli infissi presi in esame, sono stati proposti dei confronti e delle considerazioni in relazione alle performance acustiche dei diversi modelli di campione esaminati. In particolare è interessante porre attenzione alle modalità di posa in opera degli infissi che influiscono in maniera significativa sulle reali prestazioni di isolamento acustico. È stata valutata l'influenza del tipo di vetro e del numero di battute della finestra sulle prestazioni globali del singolo infisso e l'influenza dell'inserimento di una traversa nelle portefinestre. Infine sono state prese in esame le variazioni del comportamento dei campioni inserendo diversi modelli di cassonetto per avvolgibile.

2. DESCRIZIONE DEGLI INFISSI

Sono stati testati due modelli di infisso in legno di pino massello di uno stesso produttore, indicati con il nome TIPOLOGIA A e B, sia per le finestre che per le portefinestre. Le finestre sono state installate su due diversi controtelai realizzati con profilo di lamiera di acciaio sagomata, assemblati mediante incastri e provvisti di zanche per il fissaggio a parete. Il controtelaio della tipologia B si differenzia per una larghezza maggiore di 12 mm rispetto a quello della tipologia A. Il telaio è stato fissato al controtelaio mediante schiuma poliuretanica e silicone.

Entrambi i campioni di finestra hanno dimensioni pari a 1220 x 1480 mm (misure esterne telaio) e sono a due ante.

Per la tipologia A i profilati sono realizzati in doppia battuta; le dimensioni delle sezioni dei profili dell'anta sono pari a 57x78 mm e la sezione del telaio è di 57x80 mm. La tipologia B, invece, si differenzia per la sezione delle ante mobili, pari a 69,5x78 mm, ed è realizzata con profili stondati a triplice battuta. Entrambi i modelli presentano una doppia guarnizione di tenuta applicata al telaio e nella battuta centrale. Alcuni campioni di infisso presi in esame, sia di tipologia A che B, presentano anta a ribalta.

Le portefinestre sottoposte a prova hanno dimensioni pari a 1520x2160 mm. In particolare sono stati testati modelli di tipo A e B, con e senza traversa centrale. Alcuni campioni testati presso il laboratorio di Acustica dell'Università di Perugia sono mostrati a titolo di esempio in figura 1.



Figura 1: Vista dalle due camere riverberanti di una finestra di tipo A con anta a ribalta (a) e di una portafinestra (b).

Le prove sono state eseguite all'interno delle camere riverberanti accoppiate del Laboratorio di Acustica dell'Università di Perugia, costruite rispettando le prescrizioni relative alla UNI EN ISO 140-1 [3]. Tutti i campioni sono stati montati in corrispondenza del muro divisorio fra le camere riverberanti, costituito da due file di elementi Lecablocco fonoisolante di dimensioni pari a 20 cm x 20 cm x 25 cm, intonacate da entrambi i lati, per uno spessore totale di 43 cm e un R_w stimato pari circa a 60 dB. La parete di prova presenta un foro centrale, in corrispondenza del quale è installato il campione oggetto di indagine.

Infine sono stati testati in laboratorio diversi cassonetti per avvolgibile. I campioni presi in esame sono cassonetti in MDF (C1-C2-C3) e cassonetti in lamiera di acciaio zincata (C4) e presentano diversi tipi di coibentazione. La modalità di posa in opera dei cassonetti per avvolgibile prevede l'inserimento, in corrispondenza del foro di prova, di un pannello multistrato ad elevato potere fonoisolante, di spessore pari a quello di una comune finestra (circa 6,6 cm); tale pannello simula la presenza di un infisso per quanto riguarda la superficie di appoggio del cassonetto coprirullo (figura 2(a)).

In seguito i cassonetti sono stati installati sui diversi campioni di infissi ed è stato misurato il valore di R_w del sistema complessivo. Inoltre sono stati testati anche altri sistemi completi costituiti dagli infissi con altri modelli di cassonetto (C0 e C5) di cui non sono state valutate singolarmente le prestazioni acustiche. In figura 2 sono riportate due immagini relative alle prove eseguite in laboratorio su diversi campioni di cassonetti e su sistemi completi infisso - cassonetto.



Figura 2: Vista dalle due camere riverberanti di un campione di cassonetto (a) e di un infisso con cassonetto (b).

In tabella 1 sono riportate le caratteristiche principali dei diversi campioni esaminati, distinti in finestre e portefinestre. Per quanto riguarda i cassonetti per avvolgibile, sono stati testati i soli cassonetti e successivamente infissi completi di cassonetto (tabella 2).

Tabella 1: Caratteristiche dei campioni di infissi sottoposti a prova.

Campione	Descrizione	Vetrata
F1	Finestra di tipo A	Vetro 1: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 VBE (38 dB)
F2	Finestra di tipo A	Vetro 2: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 acustico (41 dB)
F3	Finestra di tipo A	Vetro 3: 4 mm – aria 15 mm – 6/7 acustico (37 dB)
F4	Finestra di tipo A con anta a ribalta	Vetro 1: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 VBE (38 dB)
F5	Finestra di tipo B	Vetro 1: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 VBE (38 dB)
F6	Finestra di tipo B	Vetro 4: 10/11 acustico – aria 12 mm – 6/7 acustico (44 dB)
F7	Finestra di tipo B	Vetro 2: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 acustico (41 dB)
F8	Finestra di tipo B	Vetro 5: 5 mm – aria 15 mm – 8/9 acustico (39 dB)
F9	Finestra di tipo B con anta a ribalta	Vetro 1: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 VBE (38 dB)
PF1	Portafinestra di tipo A con traversa centrale	Vetro 3: 4 mm – aria 15 mm – 6/7 acustico (37 dB)
PF2	Portafinestra di tipo A con traversa centrale	Vetro 2: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 acustico (41 dB)
PF3	Portafinestra di tipo A senza traversa centrale	Vetro 2: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 acustico (41 dB)
PF4	Portafinestra di tipo B con traversa centrale	Vetro 5: 5 mm – aria 15 mm – 8/9 acustico (39 dB))
PF5	Portafinestra di tipo B senza traversa centrale	Vetro 2: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 acustico (41 dB)
PF6	Portafinestra di tipo B con traversa centrale	Vetro 2: 6/7 acustico – aria 12 mm – 6/7 acustico (41 dB)

Tabella 2: Caratteristiche dei campioni di cassonetto e dei campioni di infissi completi di cassonetto.

Campione	Descrizione
C0	Cassonetto in MDF senza coibentazione
C1	Cassonetto tipo sandwich da 11 mm con MDF (4 mm) + sugherogomma (3 mm) + MDF (4 mm)
C2	Cassonetto in MDF di 12 mm di spessore
C3	Cassonetto in MDF (12 mm) con tappo tipo sandwich (MDF (4 mm) + sugherogomma (3 mm) + MDF (4 mm))
C4	Cassonetto in lamiera di acciaio zincata con coibentazione in poliestere
C5	Cassonetto in lamiera di acciaio zincato, coibentato con polistirene espanso, ad intonacare sul lato interno
COF7	Cassonetto in MDF senza coibentazione con infisso F7
C4F1	Cassonetto in lamiera di acciaio zincata con coibentazione in poliestere con infisso F1
C2F6	Cassonetto in MDF di 12 mm di spessore con infisso F6
C5F7	Cassonetto in lamiera di acciaio zincata con coibentazione in poliestere con infisso F7
C5F6	Cassonetto in lamiera di acciaio zincata con coibentazione in poliestere con infisso F6

3. STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA DI MISURA

Per la strumentazione impiegata si rimanda ad un precedente lavoro [4], tuttavia la sorgente dodecaedrica

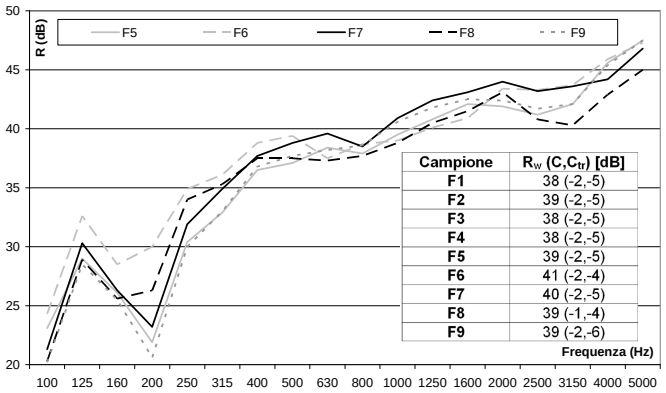
omnidirezionale è stata sostituita da una sorgente modello DL-301 di fabbricazione LOOKLINE, dotata di amplificatore e generatore di rumore (bianco, rosa e sweep).

Per le modalità di prova si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 140-3. Sono stati misurati contemporaneamente i livelli di pressione sonora in camera emittente (L_1) e in camera ricevente (L_2), in presenza di una sorgente sonora che occupa diverse posizioni in camera emittente e che emette un rumore bianco. I livelli di pressione sonora, misurati in bande di un terzo di ottava tra 100 e 5000 Hz nelle diverse posizioni microfoniche stabilite dalla normativa, sono stati mediati energeticamente. Si misura, inoltre, in camera ricevente, il tempo di riverberazione T_{60} ai sensi della UNI EN ISO 354 [5]. Quindi è possibile calcolare il potere fonoisolante del campione sottoposto a prova e il relativo indice di valutazione del potere fonoisolante R_w.

4. RISULTATI

4.1 Finestre e portefinestre

In figura 3 sono riportati i valori dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w di tutti i campioni sottoposti a prova; gli andamenti in frequenza del potere fonoisolante in bande di un terzo di ottava sono mostrati a titolo di esempio per gli infissi di tipo B. In figura 4 sono rappresentati i valori di R_w misurati per le portefinestre e i vari andamenti in frequenza del potere fonoisolante R.



Campione	R_w (C,C_{tr}) [dB]
F1	38 (-2,-5)
F2	39 (-2,-5)
F3	38 (-2,-5)
F4	38 (-2,-5)
F5	39 (-2,-5)
F6	41 (-2,-4)
F7	40 (-2,-5)
F8	39 (-1,-4)
F9	39 (-2,-6)

Figura 3: Valori di R_w(C, C_{tr}) (dB) e andamento in frequenza del potere fonoisolante R per i campioni di infissi di tipo B.

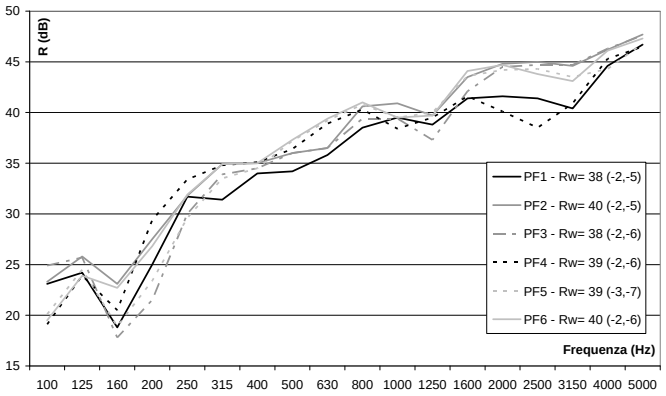
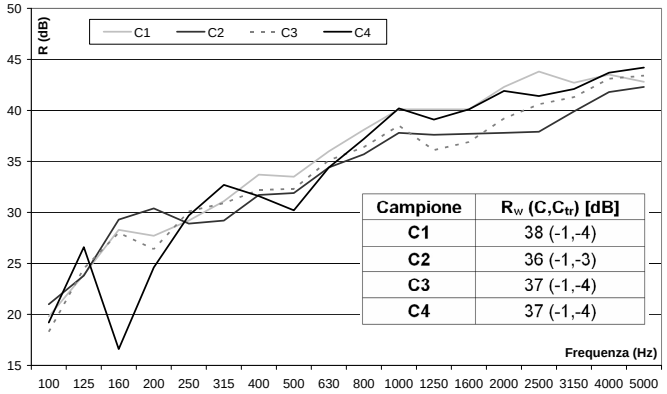


Figura 4: Valori di R_w(C, C_{tr}) (dB) e andamento in frequenza del potere fonoisolante R per diversi campioni di portefinestre.

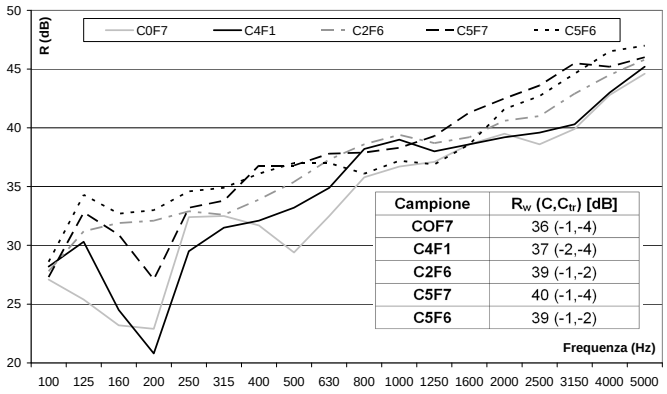
4.2 Cassonetti per avvolgibile

In figura 5 si riportano i valori dell'indice del potere fonoisolante R_w per i quattro campioni di cassonetto sottoposti a prova e l'andamento del potere fonoisolante R in frequenza per i singoli cassonetti; per gli infissi con cassonetto, R_w e l'andamento in frequenza di R sono riportati in figura 6.



Campione	R_w (C,C_{tr}) [dB]
C1	38 (-1,-4)
C2	36 (-1,-3)
C3	37 (-1,-4)
C4	37 (-1,-4)

Figura 5: Valori di R_w(C, C_{tr}) (dB) e andamento in frequenza del potere fonoisolante R per i campioni di cassonetto.



Campione	R_w (C,C_{tr}) [dB]
COF7	36 (-1,-4)
C4F1	37 (-2,-4)
C2F6	39 (-1,-2)
C5F7	40 (-1,-4)
C5F6	39 (-1,-2)

Figura 6: Valori di R_w(C, C_{tr}) (dB) e andamento in frequenza del potere fonoisolante R per diversi campioni di infissi con cassonetto.

5. ANALISI DEI RISULTATI

Dal confronto dei risultati ottenuti per i diversi campioni di infissi e per le diverse tipologie di portefinestre si nota che i tempi di riverberazione registrati in laboratorio sono confrontabili tra di loro e questo rende possibile il confronto tra i valori del potere fonoisolante misurati. Nel seguito sono analizzati i risultati sui campioni presi in esame, sia in termini di indice di valutazione del potere fonoisolante R_w sia di andamento in frequenza, al fine di evidenziare l'influenza di: tipologia di infisso (sezione dei profili e numero di battute), tipologia di vetro, tipo di controtelaio, presenza o meno di anta a ribalta, presenza o meno di una traversa nelle portefinestre, modalità di posa in opera del campione.

5.1 Influenza della tipologia di vetrata e di infisso

Esaminando l'andamento in frequenza di R per gli infissi di tipo B con diversi tipi di vetro (figura 3), si nota che i campioni che garantiscono le migliori prestazioni sono quelli che presentano vetro di tipo 4 e 2 (R_w = 41 dB per F6 e R_w = 40 dB per F7). Infatti le vetrate 4 e 2 presentano due lastre con PVB acustico e sono quelli acusticamente più performanti.

Al fine di evidenziare l'influenza della tipologia di infisso (sezione delle ante e n° delle battute) in figura 7 sono confrontati gli andamenti in frequenza di R per i campioni di tipo A e B che presentano la stessa vetrata.

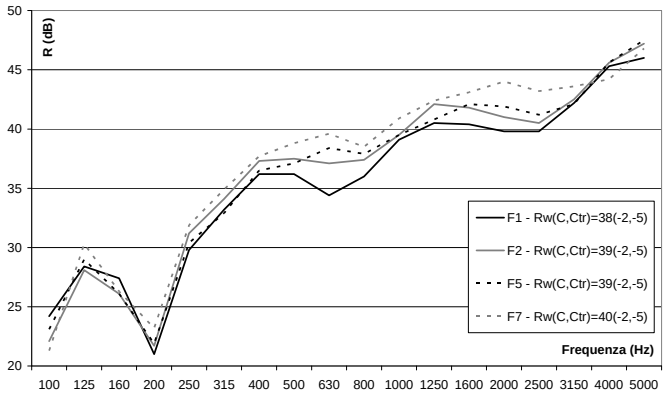


Figura 7: Andamento in frequenza del potere fonoisolante R per diversi campioni di infissi di tipo A e B.

A parità di vetro, l'indice R_w degli infissi di tipo A (F1 e F2) è inferiore di 1 dB rispetto a quello dei campioni F5 e F7 (tipo B). Sia per le finestre sia per le portefinestre si può notare il miglior comportamento della tipologia B, a parità di tutte le altre condizioni (figura 4 e figura 7). Ciò può essere imputato al fatto che gli infissi di tipo B presentano delle dimensioni della sezione dell'anta e del telaio maggiori di quelle della tipologia A e hanno una triplice battuta anziché doppia. Anche in termini di andamento in frequenza si riscontrano valori di R più elevati, soprattutto alle frequenze centrali (500-2000 Hz).

5.2 Influenza del controtelaio

Per valutare l'influenza del tipo di controtelaio sono state eseguite in laboratorio due prove relative ad uno stesso campione (F5) cambiando soltanto il tipo di controtelaio. Nella prima prova F5 presenta un controtelaio di tipo A (messo a punto per gli infissi di tipo A e di larghezza minore rispetto al controtelaio B), nella seconda prova di tipo B. In termini di R_w si riscontra un valore maggiore per il campione dotato di controtelaio di tipo B (39 dB) rispetto al campione con controtelaio di tipo A (38 dB); la differenza è evidente soprattutto alle frequenze medio-alte (500-3150 Hz). In figura 8 si riporta un grafico di confronto tra le due prove.

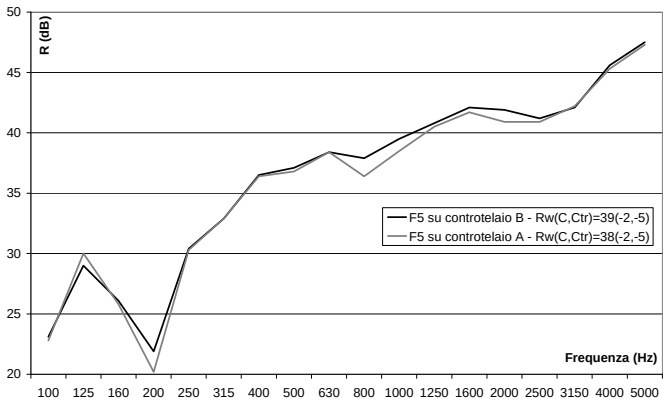


Figura 8: Andamento in frequenza del potere fonoisolante R misurato per lo stesso campione di infisso F5 con due diversi controtelai.

5.3 Influenza dell'anta a ribalta

Esaminando i risultati riportati in figura 9 relativi al potere fonoisolante R degli infissi, si riscontrano valori confrontabili per finestre con anta normale e con anta a ribalta, a parità delle altre condizioni di prova (tipologia di infisso e di vetro). L'influenza dell'anta a ribalta risulta trascurabile anche per quanto riguarda il valore di R_w misurato (per F1 e F4 (anta a ribalta) R_w è pari a 38 dB; per F5 e per F9 (anta a ribalta) R_w è pari a 39 dB).

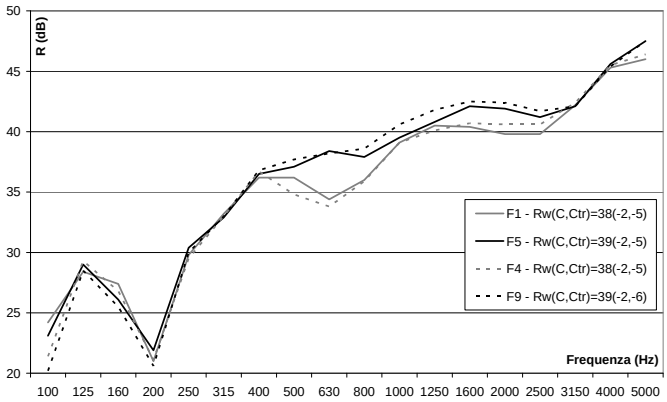


Figura 9: Andamento in frequenza del potere fonoisolante R per diversi campioni di infissi con o senza anta a ribalta.

5.4 Influenza della posa in opera del campione [6,7]

Le modalità di posa in opera degli infissi influiscono in maniera significativa sulle reali condizioni di prestazione del campione stesso. In particolare è importante esaminare il materiale che viene normalmente impiegato per riempire il giunto tra telaio e controtelaio durante la posa in opera dei serramenti.

Nel caso delle portefinestre prese in esame, per il campione PF4 la prova è stata ripetuta due volte: nella prima prova, infatti, non era stata eseguita correttamente la siliconatura del campione ed è stato misurato un valore di R_w pari a 37 dB, inferiore alle prestazioni attese. Un attento esame dell'infisso ha mostrato una posa in opera non a regola d'arte: dopo un corretto riempimento del giunto con silicone lo stesso serramento ha raggiunto un valore di R_w pari a 39 dB.

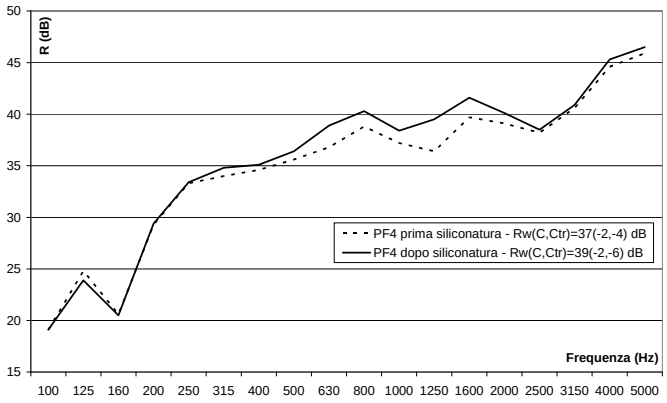


Figura 10: Andamento in frequenza del potere fonoisolante R misurato per PF4 prima e dopo la siliconatura del campione.

Anche esaminando l'andamento in frequenza del potere fonoisolante (figura 10), a seguito della corretta sigillatura del campione, si registra un aumento di R di circa 1 dB in tutte le frequenze, ma soprattutto tra 250 e 2500 Hz.

5.5 Influenza della traversa per le portefinestre

È interessante osservare come la presenza o meno di una traversa centrale nella portafinestra oggetto di indagine sia significativa in termini di indice di valutazione del potere fonoisolante R_w (figura 4). Dal confronto delle prove relative ai campioni PF2 (con traversa) e PF3 (senza traversa) emerge che in presenza di traversa R_w è pari a 40 dB, senza la traversa R_w misurato è di 38 dB. Anche confrontando i campioni PF5 e PF6 si nota un incremento di R_w di 1 dB per effetto della traversa. Infatti l'inserimento dell'asta al centro dell'infisso riduce la superficie vetrata presente e di conseguenza si riscontra un aumento dell'isolamento acustico del serramento, dovuto anche alla riduzione del fenomeno della risonanza della lastra intera, più accentuata di quella di due lastre più piccole di superficie equivalente (vedi paragrafo 5.7).

5.6 Confronto tra il potere fonoisolante misurato per le finestre e le portefinestre

Al fine di valutare l'influenza dell'area del campione e del diverso sistema di battuta in corrispondenza del nodo inferiore dell'infisso, per ogni campione è stato fatto un confronto tra l'andamento del potere fonoisolante alle varie frequenze misurato per la finestra e quello relativo alla portafinestra che presenta le medesime caratteristiche (tipologia di infisso e di vetro).

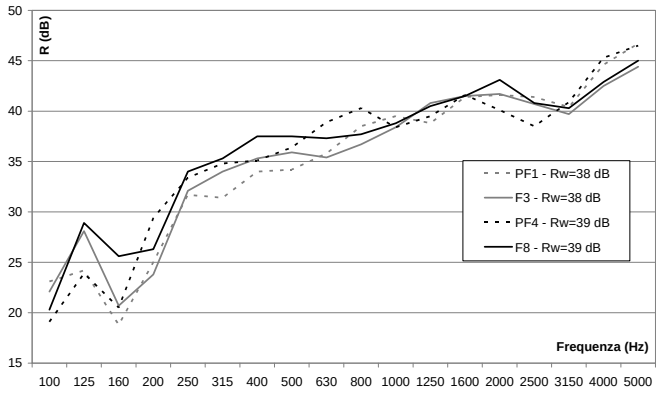


Figura 11: Andamento in frequenza del potere fonoisolante R per i campioni di infissi F3 e F8 e per le portefinestre PF1 e PF4.

In figura 11 è riportato il confronto tra l'andamento del potere fonoisolante in frequenza dell'infisso F3 e quello della portafinestra PF1 corrispondente (tipologia A con vetro di tipo 3) e il confronto tra la finestra F8 e la portafinestra PF4 (tipologia B con vetro 5). Si osserva che il valore di R_w misurato è lo stesso sia per la finestra F3 che per la portafinestra PF1 (38 dB). Tuttavia si nota un comportamento della portafinestra migliore alle medio-alte frequenze. Considerazioni del tutto analoghe si possono dedurre anche dal confronto del campione F8 con la portafinestra PF4: per entrambi R_w misurato è pari a 39 dB.

5.7 Influenza della frequenza di risonanza dell'infisso

Le prestazioni acustiche di vetrate semplici sono influenzate da fenomeni di risonanza alle basse frequenze e di coincidenza a frequenze più elevate. I sistemi vetro-camera, inoltre, sono influenzati anche dal fenomeno della risonanza massa-molla-massa. Alle basse frequenze si riscontra, quindi, una riduzione del potere fonoisolante in corrispondenza della frequenza di risonanza del sistema. Per aumentare i valori di isolamento acustico, la frequenza di risonanza di un sistema vetro-camera deve essere resa più bassa possibile, impiegando lastre di vetro pesanti e spessori di intercapedine elevati. Inoltre è bene che le diverse lastre di vetro abbiano spessore differente, in modo da ridurre le risonanze di accoppiamento. È preferibile che le lastre di vetro siano montate non parallele tra di loro, in modo da evitare riflessioni speculari.

Esaminando l'andamento in frequenza del potere fonoisolante degli infissi oggetto di indagine, si nota che i vetri di tipo 1 e 2, che presentano lastre di uguale spessore (3+3 mm di vetro e uno strato di PVB acustico di 0,38 mm), presentino una caduta di potere fonoisolante in corrispondenza della frequenza di risonanza del sistema: il fenomeno risulta essere più accentuato rispetto agli altri tipi di vetro. Lo stesso andamento si riscontra anche per le portefinestre.

La frequenza di risonanza massa-molla-massa di un vetrocamera può essere calcolata mediante la relazione [8]:

$$f_0 = 160\sqrt{\frac{0{,}111}{d}\left(\frac{1}{m_1'}+\frac{1}{m_2'}\right)}\,(Hz) \qquad (1)$$

dove:
m'= massa superficiale di ciascun vetro (kg/m^2) = $hx2500$ (kg/m^2);
h = spessore di ciascun vetro (m);
d = spessore della camera d'aria (m).

Per i vetri 1 e 2 la prima frequenza di risonanza calcolata è pari a 176 Hz, per il vetro di tipo 3 è pari a 177 Hz, per i vetri 4 e 5 risulta essere pari a 160 Hz.

Osservando l'andamento in frequenza del potere fonoisolante misurato per i campioni di finestre e portefinestre, si può notare che tutti i serramenti presentano una frequenza di risonanza critica compresa tra 160 e 200 Hz; inoltre i campioni con vetro di tipo 1 e 2 sono proprio quelli in cui il fenomeno è più marcato. È interessante osservare come, per i campioni di portefinestre, il fenomeno della risonanza sia fortemente attenuato dalla presenza della traversa centrale nell'infisso (campioni PF1, PF2, PF4 e PF6) (figura 4); la presenza della traversa consente un incremento del potere fonoisolante compreso tra 4 e 5 dB a 160 Hz.

5.8 Influenza della presenza dei cassonetti per avvolgibili

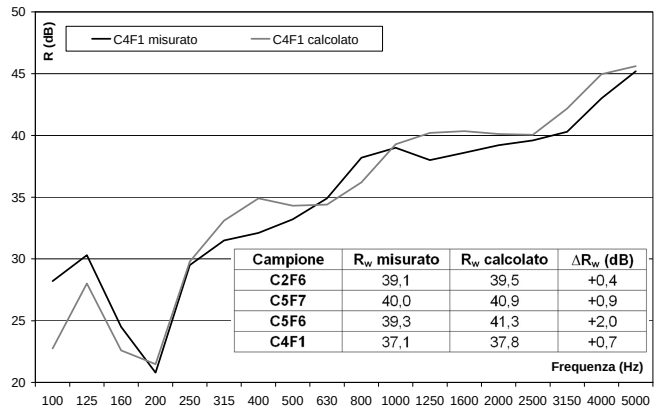
Anche la presenza di cassonetti per avvolgibili può contribuire a ridurre le prestazioni acustiche di un infisso [9]. In particolare è necessario che il cassonetto sia costituito da materiali che garantiscano un buon comportamento in termini di coibentazione termoacustica: l'assenza di coibentazione, infatti, può provocare una perdita di prestazioni in termini di R_w pari a 4 dB (campione C0F7).

Analizzando l'andamento del potere fonoisolante dei cassonetti testati e l'indice di valutazione del potere fonoisolante misurato (figura 5), si nota che il comportamento migliore è assunto dal cassonetto C1, soprattutto alle medio-alte frequenze; l'inserimento del tappo in sugherogomma al cassonetto C2 (in MDF) ha consentito un miglioramento di 1 dB. Per completare l'analisi, infine, è stato confrontato il potere fonoisolante misurato per il sistema completo infisso con avvolgibile con quello stimato per via previsionale, in accordo con dati di Letteratura. Il potere fonoisolante della struttura completa costituita da finestra e cassonetto per avvolgibile è stato calcolato mediante la relazione [8]:

$$R = -10\lg\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i}{S_{TOT}}10^{\frac{-R_i}{10}}+\frac{A_0}{S_{TOT}}\sum_{i=1}^{p}10^{\frac{-D_{n,e,i}}{10}}\right) \qquad (2)$$

dove:
R_i è il potere fonoisolante dell'elemento i-esimo costituente il sistema composto;
S_i è la superficie dell'elemento i-esimo in m^2;
S_{TOT} è la superficie complessiva totale dell'elemento in m^2;
A_0 sono le unità di assorbimento di riferimento, pari a 10 m^2;
$D_{n,e,i}$ è l'isolamento acustico normalizzato del "piccolo elemento" i-esimo, dove per "piccolo elemento" si intende qualsiasi elemento che costituisce la parete con superficie minore di 1 m^2.

Tale relazione è tipicamente impiegata per la valutazione di prestazioni acustiche delle strutture composte da elementi distinti, mentre nel caso in esame il sistema infisso con avvolgibile si dovrebbe considerare come un unico elemento (unico controtelaio). Tuttavia si è pensato di applicare ugualmente l'equazione (2), poiché il valore di R misurato per l'elemento cassonetto tiene conto delle eventuali perdite di prestazione dovute al collegamento con il telaio; infatti l'indice R_w del cassonetto è stato determinato in laboratorio installando sulla parte inferiore un pannello multistrato ad elevato potere fonoisolante che simula la presenza di un normale infisso. L'indice R_w del sistema infisso-cassonetto calcolato dalla Eq. (2) viene riportato in figura 12, a confronto con il valore di R determinato sperimentalmente; per completezza si riporta anche l'andamento in frequenza di R misurato e calcolato per il campione C4F1. Per il cassonetto C5 le prestazioni acustiche sono state desunte da certificati prodotti da altri Laboratori (R_w=43 dB).



Campione	R_w misurato	R_w calcolato	ΔR_w (dB)
C2F6	39,1	39,5	+0,4
C5F7	40,0	40,9	+0,9
C5F6	39,3	41,3	+2,0
C4F1	37,1	37,8	+0,7

Figura 12: Confronto tra l'andamento in frequenza del potere fonoisolante R misurato e calcolato per lo stesso campione.

Nonostante le due curve presentino sostanzialmente lo stesso andamento, si può osservare che il valore di R_w calcolato è maggiore di 0,4-0,9 dB per tutti i campioni, ad eccezione di C5F6 per il quale si osserva un discostamento di 2 dB. Infatti per C5F6 la misura di laboratorio non ha dato i risultati attesi, probabilmente a causa di una posa in opera non perfettamente corretta del campione, per cui si sono riscontrate perdite di prestazione soprattutto alle medio-alte frequenze (figura 6). La differenza riscontrata nell'applicazione della Eq. (2) è, quindi, contenuta al di sotto di 1 dB; tuttavia si osserva che la valutazione previsionale tende a sovrastimare le prestazioni del sistema infisso-cassonetto, non consentendo una stima a favore di sicurezza.

6. CONCLUSIONI

L'isolamento acustico di una facciata è fortemente influenzato dagli elementi acusticamente meno performanti, come infissi e cassonetti per avvolgibili, e spesso si avvicina al valore dell'elemento più debole. Numerosi fattori influenzano le prestazioni di un infisso: la tipologia di serramento, il tipo di vetro, presenza o meno di anta a ribalta, presenza o meno di traversa centrale nelle portefinestre, inserimento di cassonetti e modalità di posa in opera delle varie componenti.

La sperimentazione, effettuata su 20 campioni di finestre, portefinestre e cassonetti presso la Facoltà di Ingegneria di Perugia, fornisce importanti indicazioni sulle componenti che costituiscono gli infissi. I campioni che hanno raggiunto performance migliori in termini di R_w sono quelli che presentano entrambe le lastre stratificate con PVB acustico e quelli con dimensioni maggiori della sezione del telaio. L'inserimento di una traversa centrale in corrispondenza delle portefinestre contribuisce ad aumentare R_w di circa 1 dB, anche a causa di un minore effetto di risonanza. Dai risultati sperimentali ottenuti sono emerse importanti considerazioni sul processo di installazione del campione: è necessario impiegare appropriati materiali che consentano un riempimento adeguato del giunto tra telaio e controtelaio e non è possibile prescindere da un'attenta definizione delle modalità di posa del campione. Infine è stato preso in esame il comportamento di sistemi di infisso completi di cassonetti per avvolgibile: le prestazioni migliori sono state riscontrate per cassonetti in MDF tipo sandwich con sugherogomma. La presenza di un cassonetto può influenzare in maniera significativa le prestazioni del sistema complessivo, causando una perdita in termini di R_w compresa tra 1 e 4 dB, in funzione del tipo e della coibentazione del cassonetto.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano ringraziare la FAIL S.p.A. (Marsciano – PG) per aver fornito i campioni di prova oggetto della presente memoria.

BIBLIOGRAFIA

1. UNI EN ISO 140-3, Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 3: Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio, 2006.
2. UNI EN ISO 717-1, Acustica. Valutazione dell'isolamento acustico in edifice e di elementi di edificio. Isolamento acustico per via aerea, 1997.
3. UNI EN ISO 140-1, Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 1: Requisiti per le attrezzature di laboratorio con soppressione della trasmissione laterale, 2006.
4. F. Asdrubali, F. D'Alessandro, S.Schiavoni, Una metodologia per la misura delle prestazioni acustiche di pavimenti sopraelevati, Proc. 7° Congresso Nazionale CIRIAF, Perugia, 2007.
5. UNI EN ISO 354, Acustica. Misura del livello di assorbimento acustico in camera riverberante, 2003.
6. S.Secchi, G. Cellai, Problematiche di isolamento acustico delle facciate – Metodi previsionali, raccomandazione per la posa in opera e risultati sperimentali, Proc. 35° Convegno Nazionale AIA, Milano, 2008.
7. A. D'Albo, S. Amighetti, I materiali per la posa in opera dei serramenti esterni: misure in laboratorio della tenuta acustica del giunto, Proc. 35° Convegno Nazionale AIA, Milano, 2008.
8. G. Cellai, S. Secchi, L. Busa, La progettazione acustica degli edifici, Soluzioni tecniche e informazioni progettuali per il rispetto del D.P.C.M. 5/12/97, Alinea Editrice, pp. 18-22, 2005.
9. R. Baruffa, A. Bruschi, Variazione del potere fonoisolante di finestre in legno in funzione delle caratteristiche delle loro componenti, Proc. 33° Convegno Nazionale AIA, Ischia, 2006.

BARRIERE ACUSTICHE: STUDIO DELLA FORMA, OTTIMIZZAZIONE DELLE PRESTAZIONI ACUSTICHE, PROBLEMATICHE DI INSERIMENTO AMBIENTALE.

M. Strada[1], P. Romagnoni[2], A. Lisiero[3], S.Verza

[1] Istituto Universitario di Architettura di Venezia, [2] Istituto Universitario di Architettura di Venezia
[3] Steam S.r.l.(PD) ,

SOMMARIO

L'espansione infrastrutturale dà vita al bisogno di installare sistemi volti ad attenuare gli impatti negativi connessi alla mobilità motorizzata quali: inquinamento acustico, atmosferico, elettromagnetico e luminoso dell'aria.

Il contributo in oggetto propone la riqualificazione dello spazio, nei contesti antropizzati, attraverso uno studio di sistemi in grado di apportare mitigazione acustica, laddove le grandi reti infrastrutturali lineari hanno alterato gli standards.

Con l'ausilio di modelli acustici tridimensionale, prodotti attraverso un software di simulazione specifico, e validati da misure fonometriche in situ, l'articolo si è posto l'obbiettivo di formulare soluzioni che coniughino esigenze di prestazioni acustiche a problematiche di inserimento ambientale.

OBBIETTIVI

L'obiettivo di questo articolo è quello di definire nuove tipologie di barriere che si inseriscono in maniera adeguata in uno specifico contesto territoriale senza andare a penalizzarne le prestazioni in termini di abbattimento acustico.

Lo studio si articola in due fasi principali:

1. taratura e verifica delle validità di un modello tridimensionale acustico di simulazione in grado di riprodurre la dinamica sperimentale di barriere esistenti;
2. progettazione di una nuova tipologia di barriera adeguabile agli elementi connotativi del paesaggio che la accoglie e facilmente conformabile alla morfologia della skyline.

In altre parole il lavoro è teso a determinare una tipologia di barriera, la cui forma è studiata al fine di inserirsi nel contesto territoriale, tenendo in considerazione il carattere del paesaggio che la ospita, pur garantendo efficienza acustica. Tutto ciò, attraverso un modello previsionale calcolato con il software di simulazione: ODEON.

MODELLAZIONE ACUSTICA E APPROCCIO METODOLOGICO

Per la valutazione della resa acustica delle barriere antirumore è stato utilizzato un apposito software previsionale denominato Odeon mediante il quale è stato possibile creare un modello acustico tridimensionale dell'ambiente e calcolare i diversi parametri acustici che caratterizzano qualitativamente lo spazio sonoro. La creazione del modello tridimensionale è avvenuta per fasi successive, introducendo dapprima la geometria dell'ambiente, definendone quindi le caratteristiche di assorbimento e di comportamento acustico, collocando dentro l'ambiente una sorgente sonora e calcolando la risposta dello stesso posizionando dei ricevitori acustici nelle postazioni da indagare.

Tale codice è maggiormente idoneo alla simulazione di ambienti chiusi, ma nell'analisi di spazi, quali antichi teatri greci, che non sono totalmente confinati, prevede l'utilizzo di una copertura fittizia costituita da superfici con coefficienti di assorbimento pari a 1 per tutte le frequenze. In tal modo è riprodotta la dispersione di energia che si verifica in uno spazio aperto. Allo stessa stregua, nel caso analizzato per lo studio delle barriere antirumore, è stato concepito un ambiente virtuale le cui pareti laterali e la copertura, opportunamente dimensionate, sono rappresentate da superfici con coefficiente di assorbimento pari a 0,99 (massimo valore di assorbimento associabile ad una superficie in ODEON), al fine di emulare un ambiente non confinato.

Poiché il software previsionale ODEON, è nato per l'analisi di strutture chiuse la prima parte del lavoro ha l'obbiettivo di dimostrare la validità di tale codice di calcolo anche per ambienti non confinati.

La verifica della validità di tale modello è stata effettuata facendo riferimento a tre situazioni reali: tre barriere ubicate lungo una infrastruttura stradale a protezione di un gruppo di ricettori che si trovano in condizioni morfologiche diverse per territorio e skyline.

Tramite una campagna di misure fonometriche in situ in prossimità delle infrastrutture e ai ricettori sono stati valutati gli effetti delle barriera in termini di abbattimento acustico.

Sono stati ricostruiti poi tre modelli acustici tridimensionali rappresentativi dei tre casi reali esaminati ponendo molta attenzione nel rappresentare in modo più verosimile possibile sia la geometria del sito che le caratteristiche di assorbimento acustico dei materiali.

Il confronto tra i valori simulati e i valori effettivamente misurati in situ di Leq in prossimità della sorgente e ai ricettori ha permesso di dimostrare la validità dell'utilizzo di tale modello anche per ambienti non confinati

La seconda parte del lavoro, la "sfida", verte sulla progettazione di una nuova barriera in grado di rispondere alle caratteristiche prestazionali acustiche richieste, superando in termini di prestazioni e di forma quelle rilevate.

La risposta alla "sfida" vede protagonista una barriera la cui geometria nasce da un idea di: <<*Movimento, velocità, clima, mezzo, attrito, diffusione, riflessione, assorbimento […], inducono e segnano il percorso di propagazione fisica dell'onda sonora e rendono la sua forma eterogenea e complessa*>>, che si concretizza attraverso l'uso di una struttura e di una tecnologia ispirata dalle opere di Fuksas ma ideata con realtà materica adeguata ad un elemento lineare.

CARATTERISTICHE DEL SOFTWARE DI MODELLAZIONE ACUSTICA

Il codice di calcolo di tale programma permette di seguire il tracciamento di triangoli sferici aventi vertice nel punto di collocamento delle sorgenti sonore e sviluppo entro la cavità costituita dall'ambiente virtuale oggetto dell'analisi. Ad ogni impatto con le pareti di confine dell'ambiente virtuale e di eventuali ostacoli presenti nello stesso come ad esempio la barriera antirumore, la piramide sferica generata subisce l'effetto della riflessione causata dalla parete o dagli ostacoli su cui intercetta e prosegue il suo percorso nella direzione speculare, diminuendo di energia in ragione del tragitto percorso e delle caratteristiche di assorbenza della parete/ostacolo su cui è andata ad incidere.

Il software conta il numero di obiettivi raggiunti dalle piramidi lanciate (punti di analisi) e l'energia specifica trasferita dalla sorgente ad ogni punto di analisi definito come bersaglio, in funzione dell'energia dissipata durante tale percorso.

Il software permette quindi di tenere conto della diffrazione prodotta da un ostacolo interposto tra sorgente e ricettore all'interno dell'ambiente virtuale .

L'algoritmo utilizzato permette di variare a piacere la precisione di calcolo incrementando il numero di piramidi emesse da ogni sorgente sonora e le caratteristiche di potenza e direttività delle sorgente sonora stessa.

Il programma consente inoltre una post-elaborazione dei dati rilevati in ogni punto di calcolo in modo da realizzare curve isolivello o mappe cromatiche dei valori acustici desiderati.

VERIFICA DELLA VALIDITA' DEL MODELLO PER AMBIENTI NON CONFINATI E ANALISI DELLE PRESTAZIONI ACUSTICHE DELLA BARRIERA DI PROGETTO

Ai fini della valutazione del modello, sono state prese in esame tre barriere esistenti. La prima è situata nell'autostrada A 4, la seconda nella tangenziale Padova Sud, la terza nel raccordo A 1 Bologna. Sono stati eseguiti rilievi fonometrici condotti seguendo le indicazioni relative alla modalità di misura del rumore contenuta nell'allegato B, del D.M. del 16 marzo 1998, "Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico".

E' stato utilizzato un fonometro analizzatore 01dB-Stell, modello Solo, numero di serie 11763, classe 1 secondo le norme IEC 60651/2001, IEC 61672-1/2002 dotato di "Certificato di taratura" n° 08-750-FON, rilasciato in data 28/02/2008 da 01 dB Italia s.r.l., centro di taratura SIT n° 202. Lo strumento è stato calibrato mediante procedura PT001, in riferimento alle norme IEC EN 60804 e IEC EN 60651, CEI 29-30.

Le misure sono state eseguite alle sorgenti (in prossimità delle tre infrastrutture stradali) con fine di caratterizzarle dal punto di vista acustico e in corrispondenza dei ricettori indagati.

Nella tabella seguente vengono elencati i coefficienti di assorbimento applicati ai vari materiali utilizzati nel modello. Si precisa che le barriere esistenti, oggetto di studio, sono realizzate con pannelli in lamiera metallica di alluminio. La superficie forata è rivolta verso la sorgente di rumore e i relativi pannelli costitutivi contengono materiale fonoassorbente protetto, sul lato della foratura, da tessuti idrorepellenti.

Tabella 1: Coefficienti di assorbimento materiali.

Materiale	Coefficiente di assorbimento							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000Hz	4000 Hz	8000 Hz
Pareti laterali e copertura	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Suolo	0,08	0,08	0,09	0,12	0,16	0,22	0,24	0,24
Pannelli riflettenti della barriera policarbonato	0,09	0,09	0,1	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14
Pannelli assorbenti della barriera in alluminio	0,61	0,61	0,64	0,65	0,6	0,76	0,69	0,69
Elementi in calcestruzzo	0,16	0,16	0,13	0,15	0,11	0,13	0,14	0,14
New Jersey	0,16	0,16	0,13	0,15	0,11	0,13	0,14	0,14
Asfalto	0,04	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07
Intonaco	0,1	0,1	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Muratura	0,14	0,14	0,28	0,45	0,9	0,45	0,65	0,65
Lana di vetro	0,7	0,7	0,45	0,65	0,69	0,75	0,65	0,65
Vetro	0,18	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Acciaio	0,4	0,3	0,25	0,2	0,1	0,1	0,15	0,15
PMMA (Polimetil metacrilato)	0,09	0,09	0,1	0,12	0,13	0,13	0,16	0,16

Nel modello è stata riprodotta tridimensionalmente l'area oggetto di studio relativa alla barriera situata in Autostrada A4 Padova, ossia: la struttura viaria, gli edifici esistenti e la barriera esistente.

La sorgente sonora utilizzata, simula l'effetto prodotto da un'infrastruttura stradale di grande traffico, quale un'autostrada: si tratta di una sorgente lineare caratterizzata da un livello di potenza sonora pari a 115 dB, corrispondente a 90,70 dB/m.

La sorgente sonora è stata caratterizzata a seguito delle misure effettuate su ciglio stradale confrontando il valore di rumorosità in termini di Livello equivalente calcolato e quello effettivamente misurato.
Si ritiene opportuno sottolineare che poiché le misure del Livello equivalente a bordo strada sono state effettuate in una sezione stradale con presenza della barriera antirumore (si veda figura 2) nella simulazione effettuata ai fine della caratterizzazione della sorgente il modello acustico tridimensionale costruito includeva la presenza della barriera antirumore al fine di essere perfettamente rappresentativo della realtà; si ritiene quindi che la presenza della barriera antirumore non abbia influito nella calibrazione della sorgente.

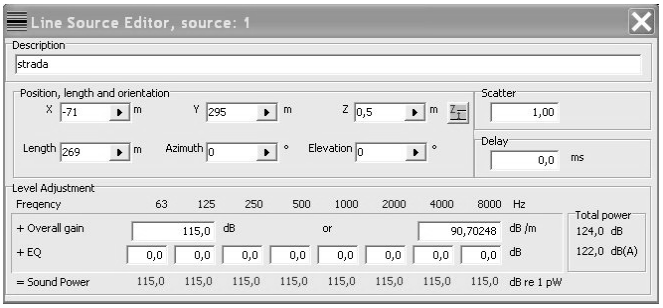


Figura 1: Descrizione della sorgente sonora.

Come anticipato nel modello acustico tridimensionale sono stati introdotti. gli edifici esistenti protetti dalla barriera antirumore.
I ricettori sono stati ubicati nei diversi piani degli edifici residenziali, siti a circa 20 m dal bordo stradale, e, successivamente, nella parte retrostante la barriera ad una distanza pari a 10 m.

Tabella 2: Caratteristiche e ubicazione dei punti ricezione segnale

Ricettore n.	Localizzazione geografica ricettori		Altezza dal suolo (m)	Descrizione
	Nord	Est		
1	45° 25' 52.73"	11° 54' 48.83"	1,60	Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera
2	45° 25' 53.80"	11° 54' 46.56"	1,60	Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera
3	45° 25' 54.76"	11° 54' 42.30"	4,60	Ric. Piano primo edificio (A)
4	45° 25' 54.99"	11° 54' 43.58"	1,60	Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera
5	45° 25' 56.28"	11° 54' 39.49"	1,60	Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera
6	45° 25' 53.90"	11° 54' 46.54"	1,00	Ric. Bordo strada A4
7	45° 25' 52.97"	11° 54' 46.34"	7,60	Ric. Secondo primo edificio (B)
8	45° 25' 53.21"	11° 54' 46.11"	1,60	Ric. Piano Terra edificio (B)

La disposizione dei ricettori nel modello di simulazione è visibile nelle figure e nella foto seguenti:

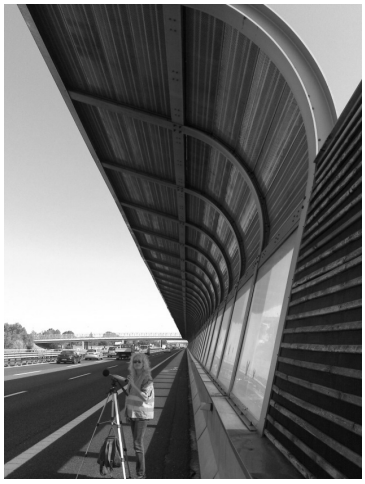


Figura 2: Barriera situata in Autostrada A4 Padova

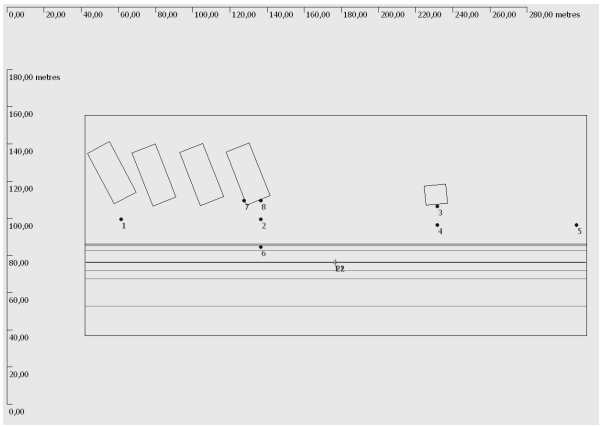


Figura 3: Barriera situata in Autostrada A4 Padova

Per la validazione del modello, i dati, misurati con il rilievo fonometrico sono stati confrontati con quelli calcolati dal software. I dati ottenuti sono riassunti nella successiva tabella 3.

Tabella 3: Dati ottenuti, Leq [dBA]

Localizzazione misure Fonometriche	Ricettore	Leq[1] misurato [dBA]	Leq calcolato [dBA]	Diff. +/-
Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera	1	61,9	63,2	1,3
Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera	2	62,1	60,2	-1,9
Ric. Piano primo edificio (A)	3	57,4	59,2	1,8
Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera	4	63,9	61,9	-2
Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera	5	63,2	61,3	-1,9
Ric. Secondo piano edificio (B)	7	54,5	56,5	2
Ric. Piano Terra edificio (B)	8	57,8	59,8	2

[1] Le misure sono state effettuate con tecnica del campionamento in periodo diurno e hanno avuto una durata pari a circa 10 minuti a misura.

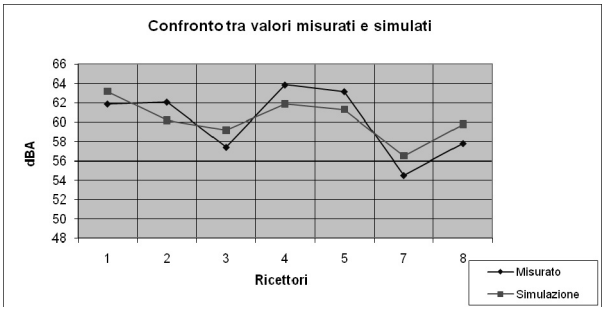


Figura 4: Confronto tra valori misurati e simulati in termini di Livello equivalente al ricettore

Dalla tabella 3 si evince che, la differenza tra valori misurati e simulati non supera mai 2 dB; si può ritenere, dunque, il grado di approssimazione della simulazione sufficientemente rappresentativo della situazione reale.
In maniera analoga si è proceduto facendo riferimento alle barriere di Bologna e Padova Sud (si vedano le seguenti immagini da Figura 5 a 11).
Una volta dimostrata la validità del modello di simulazione utilizzato è stato possibile procedere all'analisi delle risultanze prestazionali delle barriere di Padova Autostrada A4, di Bologna, Padova Sud e della barriera di progetto (di cui nel seguito se ne darà la descrizione dal punto di vista architettonico).
Al fine di effettuare un confronto, sono state inserite, nello scenario del modello di Padova Autostrada A4, le barriere di Bologna, Padova Sud e la barriera progettata, mantenendo le identiche condizioni al contorno (materiali delle superfici, sorgente lineare e posizione dei ricettori).



Figura 5: Barriera Bologna Autostrada A14

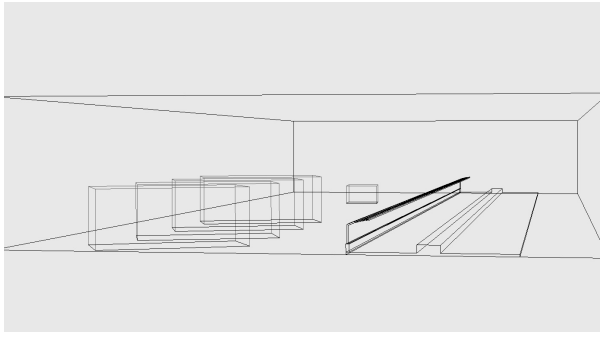


Figura 6: Barriera Bologna Autostrada A14- Modello acustico

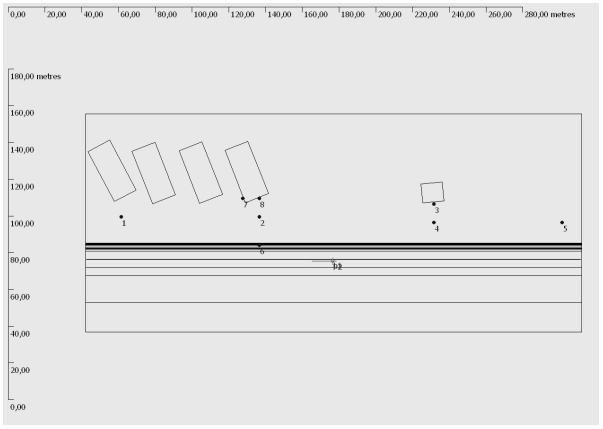


Figura 7: Barriera Bologna Autostrada A14- Modello acustico



Figura 8: Barriera Tangenziale Sud Padova

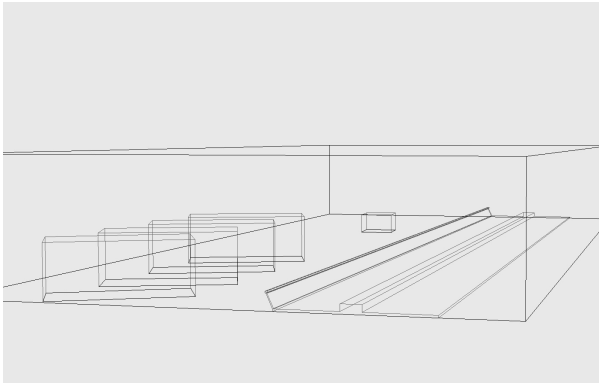


Figura 9; Barriera Tangenziale Sud Padova Modello acustico

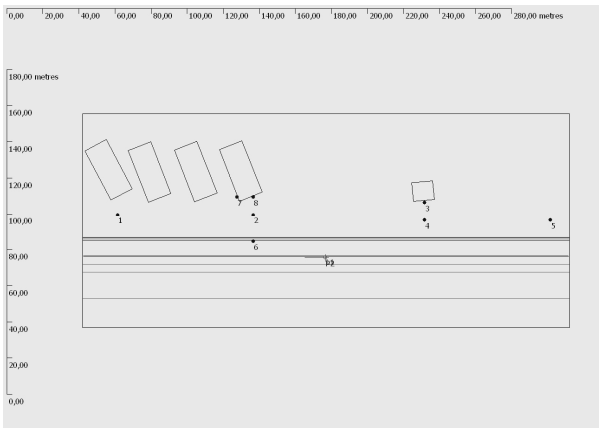


Figura 10: Barriera Tangenziale Sud Padova Modello acustico

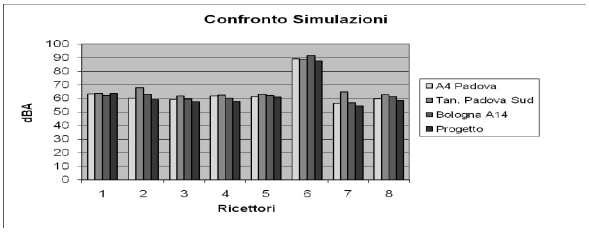


Figura 11: Confronto tra valori di Livello equivalente [dB(A)] misurati al ricettore per le barriere esistenti e quella di progetto

Tabella 4: Confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni con la presenza delle barriere.

Localizzazione Ricettori	Ricettore	Leq Simulazione [dBA] Barriera Padova A4	Leq Simulazione [dBA] Barriera Padova Sud	Leq Simulazione [dBA] Barriera Bologna A14	Leq Simulazione [dBA] Barriera Progetto
Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera	1	63,2	63,7	62,3	63,5
Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera	2	60,2	67,9	62,9	59,2
Ric. Piano primo edificio (A)	3	59,2	61,8	59,5	57,7
Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera	4	61,9	62,4	60,3	58
Ric. in area esterna 10 m. dalla barriera	5	61,3	63	62,2	61,1
Ric. Bordo strada A4	6	89,2	88,4	91,7	87,8
Ric. Secondo piano edificio (B)	7	56,5	64,8	56,6	54,5
Ric. Piano Terra edificio (B)	8	59,8	62,7	61,2	58,4

I valori ottenuti attraverso il software di simulazione consentono di affermare che l'inserimento di barriere dalla sezione semplice, realizzate spesso con materiali notevolmente impattanti per il territorio, portano al raggiungimento di una buona mitigazione. Anche tali elementi, seppure prettamente deputati ad una specifica funzione quale l'abbattimento del rumore, possono essere "oggetti di architettura" e non solo semplici "paramenti".

I risultati riportati nella Tabella 4 evidenziano come, anche forme architettonicamente articolate (ossia la barriera di nuova progettazione), mostrano risultati apprezzabili in termini di abbattimento del livello sonoro, con una contemporanea gradevole integrazione nell'ambiente circostante.

La proposta che segue intende dimostrare le opportunità che nascono dall' applicazione sincrona di nuove forme e nuove tipologie di applicazione dei materiali.

ESEMPI DI OPERE REALIZZATE:

S.S. 36 Monte Barro località Civate – Pescate (Figura 12).

Tunnel a protezione della zona di imbocco galleria; la struttura è realizzata con profili in acciaio zincato calandrati (processo di lavorazione industriale che permette di ottenere forme coniche o cilindriche; adottato per plastica, gomma, lamiere metalliche), moduli fono isolanti, fonoassorbenti in alluminio e, lastre trasparenti in PMMA nella copertura. La chiusura totale consente un risanamento completo della zona di imbocco relativamente a fumi e rumore.



Figura 12: S.S. 36 Monte Barro località Civate – Pescate

Autostrada A2 in corrispondenza dell'abitato di Chiasso.

Si sviluppa lungo 1,8 km di autostrada, coniuga in modo esemplare efficacia acustica e design. La struttura architettonica antirumore, progettata dall'Arch. Mario Botta, realizzata in profili portanti in acciaio, lastre in vetro stratificato e pannellature fonoassorbenti in alluminio, risulta una vera "opera d'arte" percepita come una fila di alberi artificiali perfettamente integrati nel paesaggio circostante (Figg. 13 e 14).



Figura 13: Autostrada A2 in corrispondenza dell'abitato di Chiasso.



Figura 14: Autostrada A2 in corrispondenza dell'abitato di Chiasso.

IL MATERIALE.

Il PMMA (Polimetilmetacrilato) è un materiale differentemente trasparente; in base alla sua "mescola" è infrangibile e modellabile per riscaldamento, a temperature relativamente basse (100° C), ciò consente la reticolazione attraverso "lastra colata". Ottenute grazie alla grande esotermia indotta dalla polimerizzazione del prodotto, le lastre, raggiungono uno spessore massimo di 3 cm, ma l'uso in campo industriale adotta un range che varia dai 15 ai 20 mm, caratteri che rendono il PMMA adeguato alla realizzazione di pareti. L'isolamento acustico garantisce una riduzione che

varia tra i 40 e i 45 dB, mentre i montanti della struttura si profilano in travi e tubolari, di acciaio e alluminio, in relazione agli impieghi specifici. Alcune formulazioni di PMMA bloccano la luce visibile cosicché da evitare effetti di abbaglio. Modularità, modellabilità, capacità di adeguarsi al contorno, rendono la struttura reticolare una soluzione interessante, in modo particolare, per risolvere la questione di mitigazione di impatto sonoro all'esterno.
Caratteristiche tecniche lastra PMMA [2]:
• *Materiale: Polimetilmetacrilato estruso*
• *Guarnizione: in EPDM compatibile a profilo seghettato antiscorrimento*
• *Colori: Incolore, azzurro, verde, marrone*
• *Spessori: 12, 15, 18 e 20mm*
• *Dimensioni: l = variabile, h = 500/1000/2000 mm*
• *Densità: 1190 kg/m3*
• *Modulo elastico: 3300 MPa*
• *Resistenza a trazione: 70 MPa*
• *Resistenza a flessione: min. 98 MPa*
• *Temperatura di rammollimento Vicat: 102°C*
• *Coefficiente di dilatazione termica: 0.07 mm/m °C*
• *Permeabilità alla luce: 90% min (dopo 10 anni 88% min) secondo DIN 5036 parte 3 tipo luce C*
• *Riciclabilità: Totale*
• *Conforme a norma tecnica ZTV Lsw 88, EN 1793 e EN 1794*
Caratteristiche acustiche della lastra nella configurazione base – Relaz. DIENCA ITF 3/2000:
• *Isolamento acustico (prove di laboratorio) DLR = 29 dB (UNI EN 1793-2) categoria B3 (UNI EN 1793-3);*
• *Isolamento acustico (prova in campo – metodo Adrienne) DLSI = 30 dB (UNI EN 1793-5) categoria B3 (UNI EN 1793-3);*
Caratteristiche meccaniche della lastra con cornice metallica conforme a norma UNI EN 1794-1 Annex A
• *Resistenza all'impatto delle pietre: conforme a UNI EN 1794-1 All.C.*

IL PROGETTO.
LINEE DI ARCHITETTURA.

Progettare architettura non coincide con "appropriazione di spazio", né con "modifica di paesaggio antropizzato". Al contrario, si declina in azioni che vanno oltre il semplice atto del "comporre".

L'infrastruttura lineare, "sub-specie architettonica" (Casamonti), interpreta il concetto di "valico delle distanze geografiche" e si propone quale collegamento che, svolgendosi lungo un territorio, mostra un universo antropico eterogeneo e caratteristico, unico in ogni "dove". In altre parole: la strada a volte sfiora, altre attraversa realtà e scenari agricoli, antropici, ambientali differenti, sfiorandoli con una percezione spesso distratta. Proprio per questo, la tensione, fino ad oggi, è stata indirizzata all'introduzione di elementi di protezione unicamente funzionali all'abbattimento del disturbo, con risultati a dir poco deleteri nel maggior numero di casi. La mitigazione acustica non può ridursi ad un atto meramente funzionale alla riduzione del suono poiché, così facendo, se da un lato si abbatte il disturbo acustico, dall'altro si aumenta l'impatto paesaggistico. Al contrario, l'intervento di bonifica acustica si deve inserire quale proposta di soluzione ottimale, complementare al paesaggio ambientale-architettonico che lo subisce e al sistema infrastrutturale che lo rende necessario. La barriera non come "cesura" tra lo stratificato storico-antropico e la linea di attraversamento, ma come elemento che, per caratteri connotativi formali e materici, permetta l'unione tra il fruitore istantaneo della strada e l'attore della realtà sedimentata che la abita.

La barriera diviene dunque, vero manufatto architettonico lineare, in dialogo con i "volumi" d'intorno ma, a "volume" zero per sub-architetture non confinate.

LINEE DI ARCHITETTURA: PROGETTO.

Movimento, velocità, clima, mezzo, attrito, diffusione, riflessione, assorbimento inducono e segnano il percorso di propagazione fisica dell'onda sonora e rendono la sua forma eterogenea e complessa.

Da queste considerazioni nasce la geometria lineare e articolata che definisce il progetto della nuova barriera, la quale, si propone di migliorare i risultati in termini di bonifica acustica e, di inserirsi nell'ambiente con minore impatto, rendendosi aderente alle caratteristiche della sub-architettura autostradale: luogo della velocità e del movimento. Come si può evincere dalle rappresentazioni successive.

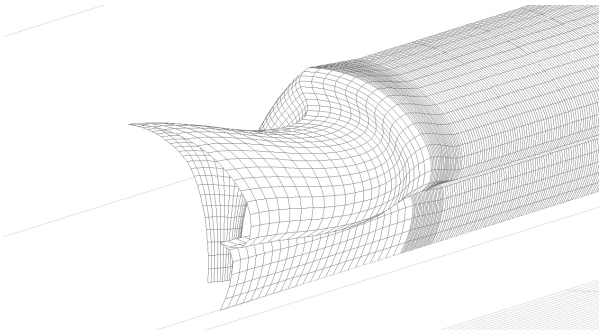


Figura 15: Rappresentazione tridimensionale della barriera di progetto

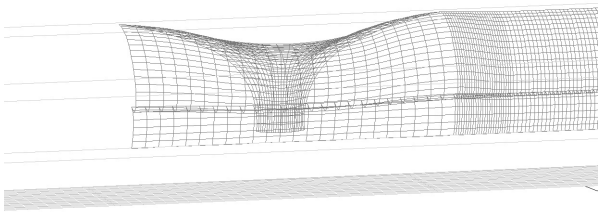


Figura 16: Rappresentazione tridimensionale della barriera di progetto

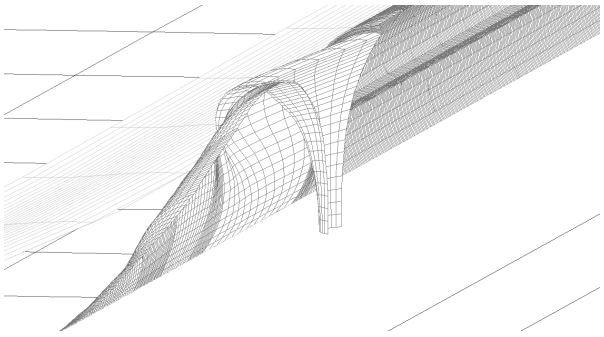


Figura 17: Rappresentazione tridimensionale della barriera di progetto

[2] da brochure tecnica Tubosider S.p.A Asti.

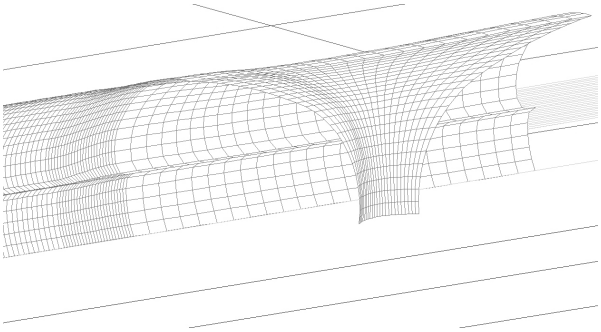


Figura 18: Rappresentazione tridimensionale della barriera di progetto

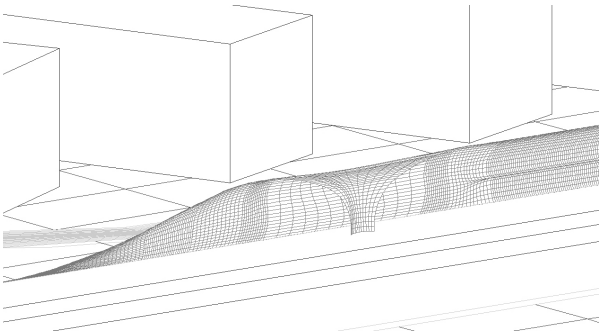


Figura 19: Rappresentazione tridimensionale della barriera di progetto

BARRIERA DI PROGETTO: SIMULAZIONE

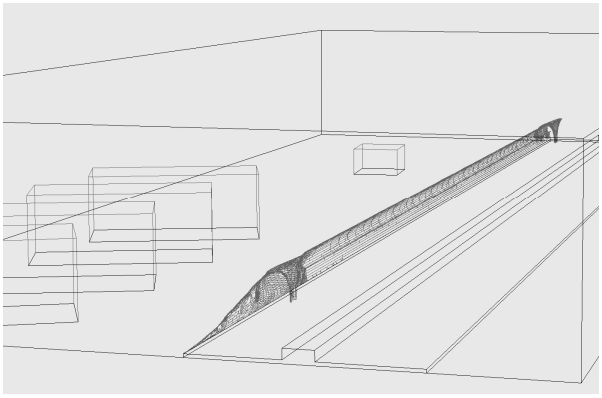


Figura 20: Rappresentazione del modello acustico tridimensionale della barriera di progetto

CONCLUSIONI.

I risultati riportati nella Tabella 4 evidenziano come, anche forme architettonicamente articolate (ossia la barriera di nuova progettazione), porgano risultati apprezzabili in termini di abbattimento del livello sonoro con una contemporanea gradevole integrazione nell'ambiente circostante.

L'uso, nel caso specifico, di un telaio a struttura reticolare con moduli triangolari rende l'elemento modellabile in altezza e forma così da adeguarsi, nel suo svolgersi lungo il percorso stradale, alla specifica morfologia del paesaggio interessato alla mitigazione dell'impatto acustico. In altre parole, la barriera può variare la sua altezza in rapporto alla presenza dei ricettori riducendo così l'impatto "barricata visiva". Nell'ipotesi di dover coprire un tratto molto lungo di infrastruttura, si può quindi modificare l'altezza della barriera solamente dove effettivamente necessario, evitando di mantenere la struttura uniforme in coincidenza di tratti dove i ricettori sono assenti (es. il caso di Bologna: la barriera risulta continua ed uniforme anche in zone coincidenti con aree agricole solamente per mantenere omogeneità strutturale). L'effetto di ostruzione è limitato notevolmente anche dall'uso del PMMA. Tale materiale, evitando forti escursioni cromatiche nel paesaggio, si amalgama ai colori del cielo.

BIBLIOGRAFIA:

1. R. Lazzarin, M. Strada, "Elementi di acustica tecnica", 3 Ed., Cleup, Padova, 2001.
2. G. Moncada Lo Giudice, S. Santoboni "Acustica", Ed. Masson, Milano, 1997.
3. "Manuale di acustica applicata", a cura di R. Spagnolo Torino, Utet, 2001.
4. Commissione Interaziendale ANAS, Ente Ferrovie dello Stato, Soc. Autostrade, AISCAT, Ministero dell'Ambiente: "Istruzioni per l' inserimento ambientale delle infrastrutture stradali e ferroviarie con riferimento al controllo dell' inquinamento acustico", 1992.
5. F. Rossi, R. Baruffa: "Criteri per la esecuzione degli interventi di bonifica acustica", Collana tecnico scientifica CIRIAF-Ministero dell'Ambiente, Volume n. 6, 2000.
6. Tubosider S.p.a Asti: Brochure tecnica aziendale.
7. Rivista Strade & Autostrade,"Un design innovativo per una barriera ancora più efficace", n. 3/1997 .
8. G. Brero, M. Correggia, P. Rossi "Dispositivi anti - rumore nelle aree urbane: architettura e risultato acustico", Rivista Strade & Autostrade, n. 6/2004.
9. Rivista ECOAMERICA, "Proyecto Autopista Central Ejes Norte Sur y General Velásquez", novembre 2003.

ESPERIENZE DI ARCHITETTURA SONORA NELLA PROGETTAZIONE ACUSTICA DELLE PIAZZE

Sergio Luzzi[1], Raffaella Bellomini[1], Rossella Natale[1], Beatrice Gentili[2]
[1]Vie En.Ro.Se. Ingegneria [2]Politecnica Ingegneria e Architettura

SOMMARIO

In questa memoria gli autori riportano alcuni cenni metodologici ed esempi applicativi di progettazione delle aree quiete urbane, previste dalla Direttiva 2002/49/CE e dal suo Decreto nazionale di recepimento.

Si descrive in particolare la metodologia di progettazione della riqualificazione acustica di alcune piazze di Firenze, basata sull'analisi quantitativa e qualitativa del clima acustico esistente, sull'analisi storica, sociale e funzionale dell'elemento piazza e del quartiere in cui si trova, sulla tipologia di frequentazione da parte degli "utenti", sulla loro percezione dello spazio da essi frequentato e sui desideri in merito ad esso.

Si tratta di esperienze di progettazione partecipata che ben si adattano allo spirito di integrazione fra i diversi piani di risanamento, contenimento e controllo del rumore che ha caratterizzato la stesura e del Piano d'Azione strategico dell'agglomerato di Firenze e del Piano Comunale di Risanamento Acustico della città. Nel dare attuazione alle azioni di risanamento e miglioramento delle condizioni acustiche di particolari "ambiti di azione" selezionati a partire dalle analisi comparate degli strumenti di mappatura del territorio e delle aree interessate dalle infrastrutture e dai servizi di trasporto, si sono individuate le piazze come elemento di quiete pubblica, molto importante per il tessuto urbano di una città storica come Firenze.

Nello studio di caso si dà evidenza al paesaggio sonoro come componente essenziale del paesaggio urbano e all'architettura sonora come elemento essenziale per la sua corretta riqualificazione.

INTRODUZIONE

All'interno della pianificazione del controllo dell'inquinamento acustico delle aree urbane, particolare importanza rivestono le aree quiete, introdotte dalla Direttiva 2002/49/CE. Si tratta di porzioni di territorio che devono essere tutelate dal rumore e allo stesso tempo rese gradevoli per consentirne la fruizione ottimale da parte dei cittadini.

Tali aree sono tanto più preziose quanto più si trovano in contesti di forte urbanizzazione e circondate da sorgenti infrastrutturali significative.

E' il caso delle piazze collocate in ambiti urbani densamente popolati che spesso si identificano come oasi all'interno del caos cittadino.

Gli autori di questa memoria hanno curato la redazione del Piano Comunale di Risanamento Acustico di Firenze e del Piano d'Azione Strategico dell'agglomerato urbano fiorentino e presentano la loro esperienza di progettazione della riqualificazione acustica di alcune piazze, basata sulla metodologia dei soundscapes e dell'architettura sonora.

LA PIANIFICAZIONE ACUSTICA DEL TERRITORIO SECONDO I MODELLI "EVIDENCE BASED"

Il rumore ambientale nei contesti urbanizzati può essere definito come quell'insieme di emissioni acustiche prodotto in massima parte dalle attività umane e percepito come disturbante dai frequentatori degli spazi urbani antropizzati, ovvero presente come vero e proprio inquinante nei cosiddetti ambienti di vita (case, scuole, parchi, spazi aperti).

In sede di analisi propedeutica al risanamento e di conseguente pianificazione degli interventi, è perciò possibile considerare alcuni aspetti di evidenza legati alla percezione soggettiva dei suoni presenti in uno scenario urbano, come utili e, talvolta necessarie, integrazioni della loro entità misurata; la stessa cosa può dirsi del clima acustico, inteso come complesso, armonico e disarmonico, di suoni che caratterizzano il paesaggio sonoro di un'area.

Nel contesto più ampio di applicazione del sistema per l'analisi di rilevanza degli inquinanti proposto da Kim [6] anche per il rumore si trae una rete di relazioni causa-effetto: nello specifico del il rumore ambientale, utilizzabile nei due sensi.

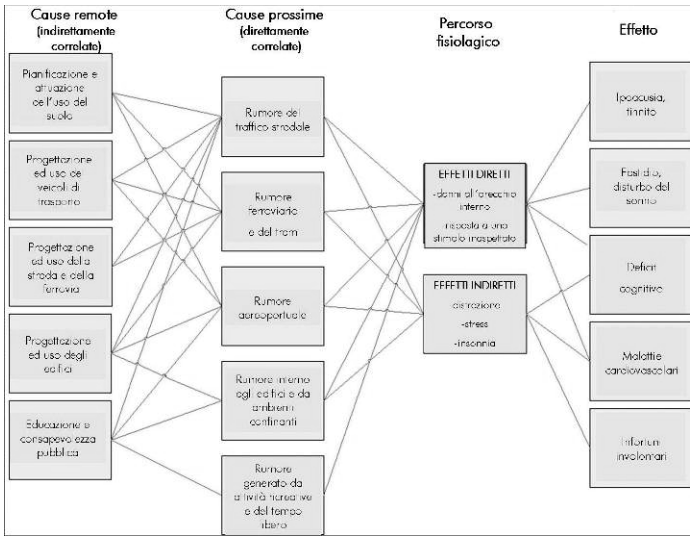


Figura 1: Causal web per l'analisi di rilevanza del disturbo da rumore

Il percorso a ritroso, basato sull'"evidenza" di rumore è l'approccio metodologico più adatto per l'armonizzazione e integrazione tra i piani per la gestione del territorio elaborati in questi anni in applicazione della Direttiva END nei paesi con legislazioni preesistenti.

Questo approccio, che ha trovato numerose applicazioni nei campi della medicina e della salute pubblica, è basato sulla valutazione dell'esperienza individuale e dell'evidenza esterna di un determinato fattore di disagio o fonte di malattia, rappresentato mediante un indice denominato Burden of Disease Index [3] e definito in termini di frazione impattante ovvero di rapporto relativo tra i dati di esposizione e la risposta all'esposizione nei confronti di un determinato inquinante (o fattore di rischio). In figura 2 è illustrato in forma schematica il diagramma di relazione per il calcolo del Burden Disease Index.

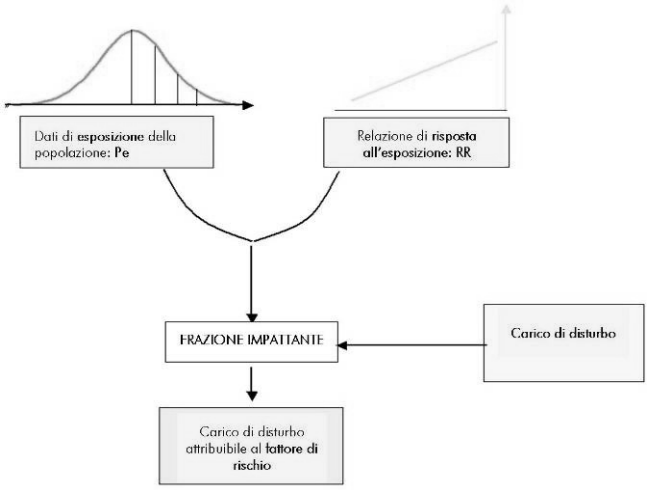


Figura 2: Contributo causa-effetto (Burden Disease Index)

Una conferma della bontà di questo approccio, basato sull'evidenza, cioè sull'importanza relativa della percezione rispetto all'entità misurata di un inquinante ubiquitario come il rumore ambientale, si ricava dall'analisi delle informazioni raccolte dal Working Group Noise di EUROCITIES (il network delle principali città europee) mediante un questionario somministrato agli amministratori delle città nel 2008. Da questa analisi emerge come la percezione del rumore come fattore disturbante non sia distribuita in modo omogeneo, a parità di livelli misurati; in altre parole la risposta all'esposizione è diversa, a parità di livelli di esposizione, al variare del contesto.

Dal confronto dei dati relativi ai livelli di esposizione al rumore misurati e alle relative risposte all'esposizione raccolte attraverso il questionario è possibile notare quanto diversa sia la considerazione del rumore come un grave problema in aree urbane omologhe di città aventi praticamente livelli identici di clima acustico.

Nelle Figure 3 e 4 sono rappresentate: la correlazione con l'esposizione a determinati livelli di rumore e la percezione del disturbo in diverse città europee, nonché, nelle stesse città, la percezione generale del rumore come problema grave.

Muovendo da questo approccio, secondo un indirizzo condiviso con il Comune di Firenze, committente dei lavori, gli autori hanno lavorato alla stesura del piano di risanamento acustico e del Piano d'azione strategico previsto dal D.Lgs. 194/2005, di recepimento della Direttiva 2002/49/CE, per quanto riguarda gli aspetti relativi alla determinazione e alla individuazione delle Aree Quiete.

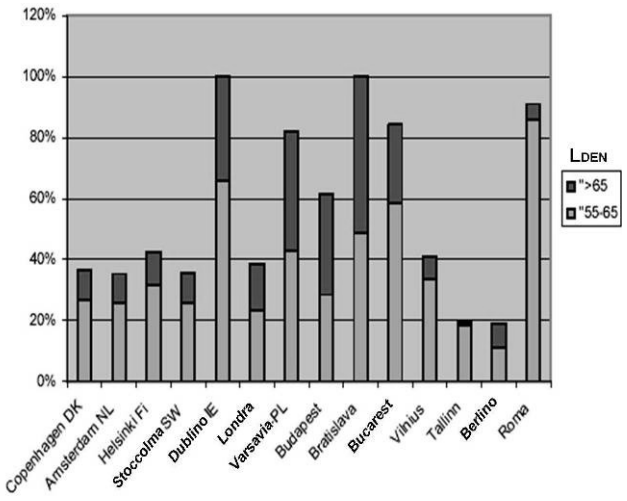


Figura 3: Livelli di rumore L_{DEN} in 14 capitali europee

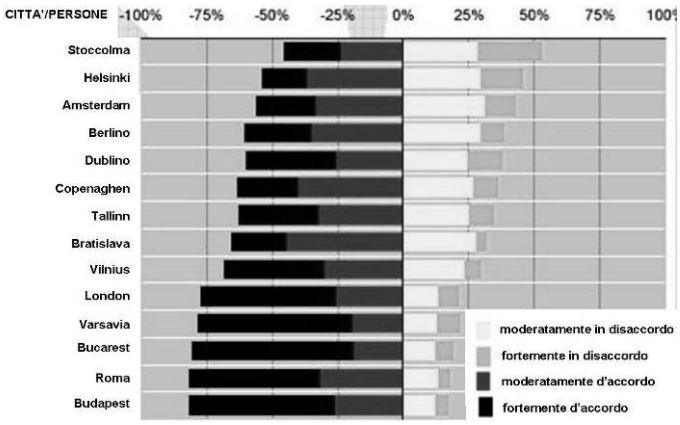


Figura 4: Percezione del rumore come un grave problema in 14 capitali europee

IL PIANO D'AZIONE DI FIRENZE: AREE QUIETE E METODOLOGIA INTEGRATA

Il Piano d'Azione di Firenze è stato sviluppato secondo criteri di progettazione integrata che hanno portato alla redazione di uno strumento di pianificazione basato su macro aree territoriali, ognuna delle quali caratterizzata al suo interno dalla presenza di Aree Critiche e Aree Quiete [Figura 5].

Gli "ambiti strategici di azione" sono stati individuati come porzioni di territorio comprendenti possibilità di intervento convergenti per il risanamento delle aree critiche e per la valorizzazione delle aree quiete in esse contenute. Tenendo conto anche degli interventi strategici già programmati dall'amministrazione comunale e dai gestori delle infrastrutture e dei servizi di trasporto, è stato prodotto un rapporto relativo a:

- analisi acustica delle aree critiche con pianificazione e fattibilità di possibili interventi di risanamento, attivo o passivo su sorgenti critiche e ricettori sensibili,
- analisi acustica delle aree quiete o "potenzialmente" quiete e, laddove necessario, valutazione di fattibilità di interventi di risanamento e/o riqualificazione acustica,
- analisi acustica complessiva e integrata dell'ambito strategico d'azione con valutazione di fattibilità di interventi strategici e puntuali di risanamento e/o riqualificazione aventi valenza generale sull'ambito.



Figura 5: Ambiti di azione strategici nel Comune di Firenze

All'interno degli ambiti di azione si è proceduto a selezionare le aree quiete. Sono state svolte indagini fonometriche ed elaborazioni modellistiche per la valutazione della quantità di rumore e studio dei paesaggi sonori per la valutazione della qualità acustica di aree appartenenti alle seguenti categorie:

- aree verdi annesse ad uno o più edifici scolastici;
- giardini (aree verdi di estensione inferiore a 25.000)
- parchi (aree verdi di estensione superiore a 25.000 mq")
- percorsi di collegamento fra parchi e fra aree verdi;
- piazze.

Le prime quattro categorie rappresentano zone normalmente deputate alla quiete, l'inclusione delle piazze è invece frutto di una scelta strategica, legata alla scarsità e alla maldistribuzione di aree verdi urbane, tipica delle città storiche come Firenze.

Questa scelta è un elemento caratterizzante la strategia di risanamento e miglioramento acustico dell'agglomerato, considerando il fatto che le aree quiete (o destinate a diventarlo) in molti casi si trovano in prossimità di infrastrutture viarie con elevati flussi o di sistemi infrastrutturali importanti (linee ferroviarie di attraversamento, aeroporto) e che pertanto esse saranno oggetto di necessari interventi di risanamento.

La procedura di analisi applicata alle aree quiete ha previsto la simulazione dei livelli equivalenti di pressione sonora su una griglia di punti distanti 10m nelle due direzioni a un altezza di calcolo posta a 1,8 m dal suolo, rappresentativa dell'altezza uditiva dei possibili fruitori dell'area.

Il risultato delle simulazioni espresso in ogni punto in termini di L_{DAY} è stato confrontato con il valore di qualità dell'area previsto dal Piano Comunale di Classificazione Acustica per il periodo diurno, ritenuto maggiormente rappresentativo dell'intervallo di possibile fruizione dell'area, individuando per ciascuna area le eventuali sotto aree ove il limite di qualità è superato.

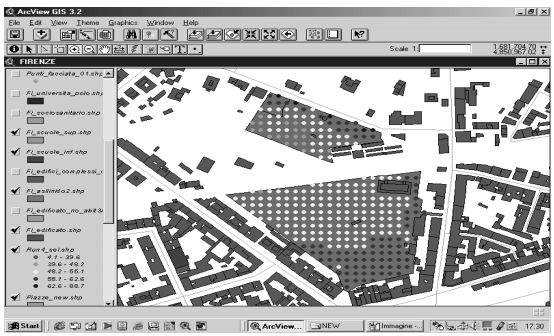


Figura 6: Griglia di punti nel modello di un'area quieta

L'analisi quantitativa porta così a determinare quali delle aree sono effettivamente quiete e quali invece si trovano in una situazione di criticità. In figura 7 si riporta un esempio di uscita grafica analisi modellistica di tipo quantitativo eseguita sulle Aree Quiete.

In alcune aree campione, rappresentative delle diverse categorie sopra elencate, sono state svolte indagini sul campo, raccogliendo dati utili per l'analisi di tipo qualitativo (sopralluoghi, campagne di ascolto, questionari, soundwalks con registrazioni binaurali). E' stato così possibile impostare la riprogettazione dell'area a partire dalla percezione e dalle aspettative dei suoi frequentatori (attuali e potenziali).

Così le caratteristiche fisiche dei suoni che caratterizzano uno spazio sono state messe in relazione con quelle psicoacustiche relative alla percezione dell'utente.

L'analisi dei paesaggi sonori nelle aree quiete è stata orientata a una mirata progettazione di sistemi e strategie di risanamento, con i seguenti obiettivi di qualità:

- massimizzazione della superficie fruibile,
- massimizzazione del numero di fruitori,
- massimizzazione dell'indice di gradimento dell'area.

Ogni area o sub-area è stata investigata applicando una procedura che identificasse, riconoscesse, caratterizzasse e localizzasse tutti i tipi di suono che contribuiscono al variegato clima acustico dell'area.

Nella figura 7 sono illustrate una serie di immagini relative all'analisi multi approccio di un'area quieta, estratte dal Piano d'Azione di Firenze.

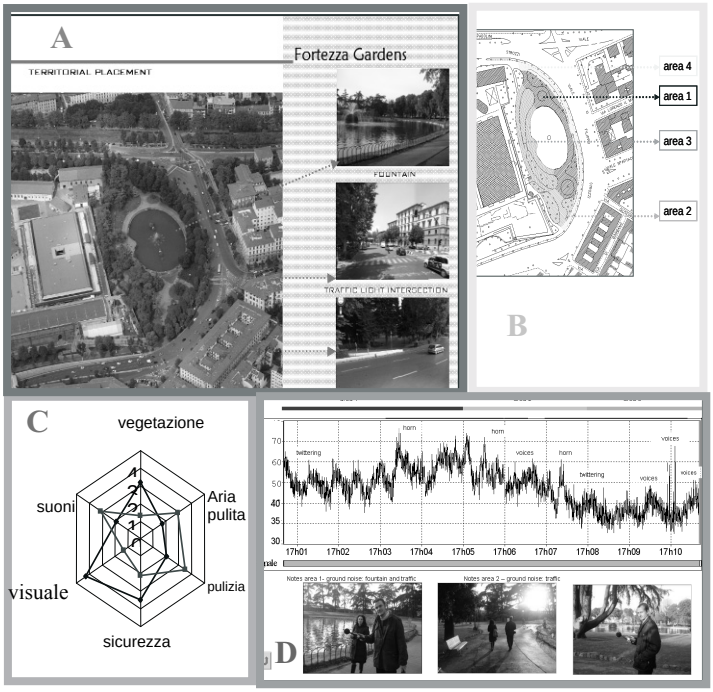


Figura 7: Analisi acustica di un area quieta (Piano d'Azione di Firenze) – A: inquadramento territoriale con individuazione delle sorgenti sonore principali; B: suddivisione in sub-aree acusticamente omogenee; C: rappresentazione grafica della correlazione fra la valutazione di qualità dei diversi aspetti che caratterizzano un'area (visuale, suoni, vegetazione, area pulita, pulizia, sicurezza)e la percezione di fastidio espresso dai fruitori; D: storia temporale del livello di pressione sonora e indicazione degli eventi sonori registrati durante una passeggiata sonora.

IL CASO DI STUDIO: PIAZZA DELLA VITTORIA

Piazza della Vittoria è un punto di riferimento per i fiorentini che abitano nella zona e per i "piazzaioli", ovvero per tutti quei giovani, liceali e non, che da generazioni l'hanno eletta a punto di ritrovo e di aggregazione.

Su questa piazza rettangolare si affacciano alcuni palazzi in stile liberty "Coppedè" fra i quali si segnalano i due ove hanno sede il Liceo Ginnasio Dante e la casa di cura Villa Maria Teresa. Piazza della Vittoria è circondata da un quadrilatero di strade caratterizzate da importanti flussi di traffico: via Fratelli Ruffini, via Francesco Puccinotti, via della Cernaia, via Giuseppe Cesare Abba.

Attualmente la piazza versa in una condizione di degrado, ma resta molto frequentata: dagli studenti del liceo Dante che attendono in piazza il suono della campanella di ingresso a scuola e in piazza si radunano al termine delle lezioni e nei pomeriggi di bel tempo, dai ragazzi che vi si recano per giocare a pallone, dagli anziani del quartiere e da mamme con i bambini. La condizione di degrado in cui versa riguarda non solo lo stato di manutenzione del verde, ma anche la pulizia e la carenza di adeguate attrezzature di arredo urbano, attualmente limitate alla sola presenza di alcune panchine posizionate nella zona centrale lastricata. Una fra le cause riconosciute di questa condizione deriva dal fatto che la piazza viene utilizzata come "parcheggio" dai residenti del quartiere durante i giorni della pulizia delle strade, impedendo al verde delle aiuole di crescere e rinvigorirsi.

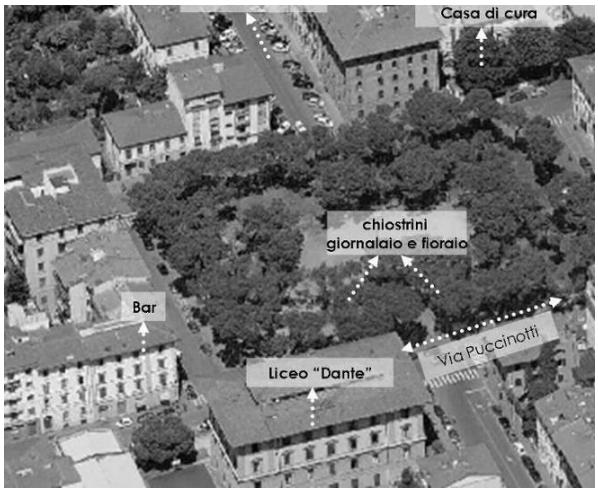


Figura 8: Inquadramento territoriale di piazza della Vittoria

PROGETTAZIONE PARTECIPATA E ANALISI DEL PAESAGGIO SONORO

L'approccio della progettazione partecipata ha visto il coinvolgimento di tutte le categorie di utenti della piazza.

È stata condotta una campagna di ascolto per le seguenti categorie di frequentazione o presenza in piazza o nel suo intorno:

- studenti del liceo Dante,
- esercenti di attività che prospettano sulla piazza,
- anziani,
- residenti nel quartiere,
- mamme e baby sitter
- giovani "piazzaioli" (frequentatori assidui della piazza)

I rappresentanti di ciascuna categoria, sono stati intervistati e hanno messo in evidenza le problematiche della piazza e le proprie esigenze. In collaborazione con il Liceo Dante, è stato proposto a un campione significativo di studenti, un questionario a risposte aperte dove poter descrivere, anche graficamente, come vorrebbero che fosse la "loro" piazza, comunicando quanto dell'esistente è, a loro avviso, irrinunciabile e quanto di ciò che manca è particolarmente desiderabile.

Parallelamente, è stata condotta un'analisi del paesaggio sonoro, la cui metodologia era già stata applicata ad alcune aree quiete campione del Comune di Firenze, comprese nel Piano d'Azione strategico. Tale metodologia recepisce pienamente il concetto di progettazione partecipata, in quanto si basa sulla percezione e valutazione soggettiva dei suoni dell'ambiente. Per cui sono stati somministrati, agli utenti stessi della piazza, altri questionari, necessari per capire quali fossero le loro aspettative sensoriali. Nelle figure 9 e 10 sono riportati alcuni risultati sintetici delle analisi sulla percezione e della campagna di ascolto.

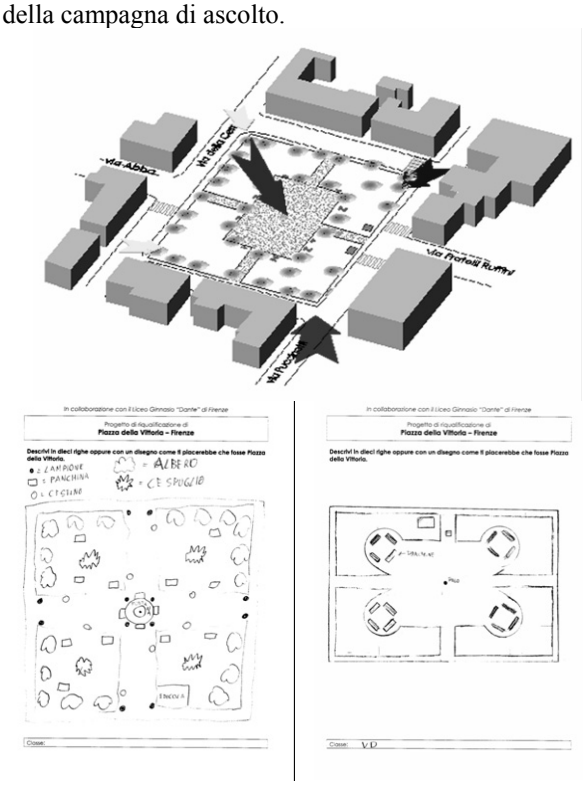


Figura 9: Analisi dei livelli di gradimento delle sub-aree(la dimensione e il colore delle frecce indica i diversi livelli di gradimento: rosso= alto, blu= medio, giallo= basso); alcuni esempi di idee per la piazza proposti dagli studenti del Liceo Dante.

Nella piazza sono state individuate 4 sub-aree, distinte per funzione, tipologia di arredo, omogeneità di funzioni e tipicità dei paesaggi sonori correlati.

Nell'area della piazza sono state effettuate "soundwalks" ovvero "passeggiate sonore", in cui un operatore, individuati i percorsi significativi, effettua delle registrazioni audio mediante sistemi di acquisizione multicanale e cuffie binaurali per studiare gli attuali eventi sonori localizzati per ogni sub-area nei diversi periodi della giornata. I periodi considerati sono:

- I periodo (dalle ore 8:00 alle ore 11:00), in cui gli eventi caratterizzanti sono il sostare degli studenti nella piazza, prima dell'ingresso a scuola, le persone che transitano, in modo più o meno veloce, quelle che sostano.
- II periodo (dalle ore 12:00 alle ore 14:00), in cui l'evento caratterizzante è l'uscita dei ragazzi del liceo dalle lezioni.
- III periodo (dalle ore 16:00 alle ore 18:00), in cui gli eventi caratterizzanti sono i ragazzi che giocano a pallone e gli

anziani che accompagnano i bambini a giocare in piazza.

Tali registrazioni sono poi post-elaborate evidenziando gli eventi sonori caratterizzanti la storia temporale del livello di pressione sonora rilevata.

Per gli stessi periodi e per tutte le sub-aree individuate sono state effettuate rilevazioni fonometriche puntuali, in bande di terzi di ottava. Dall'integrazione di questi dati fonometrici misurati contemporaneamente alle passeggiate sonore e agli altri elementi analitici dei soundscapes, con quelli presenti nel Piano d'Azione e negli altri piani di risanamento e contenimento acustico, si è derivata anche una mappa acustica dinamica della piazza.

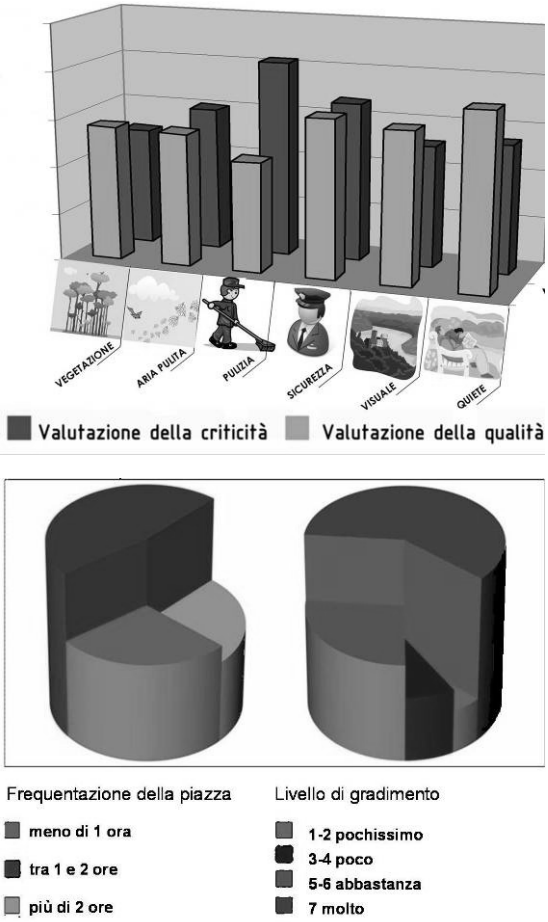


Figura 10: Analisi del paesaggio sonoro

In questa è possibile vedere l'andamento dei livelli equivalenti LAeq di rumore nel periodo di riferimento diurno in parallelo all'analisi qualitativa delle sorgenti sonore prevalenti che li determinano.

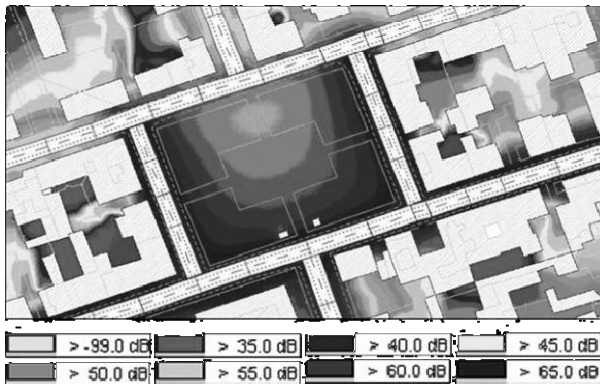


Figura 11: Mappa acustica dinamica di Piazza della Vittoria

LA PIAZZA RISCOPERTA E LE "PIAZZE NELLA PIAZZA"

La scelta operata dagli autori del progetto di Piazza della Vittoria si colloca su un piano differente dalla linea di riqualificazione delle aree urbane e delle piazze in particolare che negli ultimi anni ha visto a Firenze la collocazione di vere e proprie barriere perimetrali, sia pure mascherate da fioriere o integrate con arredo a verde.

Il paesaggio visivo e sonoro (landscape e soundscape) di queste piazze rivela come la protezione degli spazi interni dal rumore stradale sia stata l'unico obiettivo, ottenuto anche a costo di trasformare la piazza in una specie di "gabbia acustica", di sistema che viene chiuso per preservarne la quiete, spesso intesa come mero rispetto del limite previsto dal piano comunale di classificazione acustica.

La proposta progettuale di piazza della Vittoria introduce un approccio diverso nello scenario della progettualità fiorentina con l'impiego di metodi e soluzioni alternative o integrative rispetto a quelle sopra descritte. Soluzioni che andando oltre al risanamento acustico della porzione di territorio, possano, in modo attivo e partecipato, restituire alla piazza la sua propria connotazione civile di area destinata all'incontro, al riposo, al divertimento: in una parola alla fruizione da parte dei cittadini, considerando la gradevolezza del fruire importante quanto e forse più del semplice raggiungimento dell'obiettivo fonometrico.

Più in generale si può vedere questa metodologia come un tentativo per far sì che la città si riappropri dei propri spazi urbani pubblici. Per far ciò è necessario che gli interventi sulle aree quiete siano trasversali tra le diverse aree di pianificazione e di fruizione (paesaggio, viabilità, luce, suono, verde, attrezzature) con riferimento al benessere di tutti gli utenti, quelli attuali e quelli potenziali. Nel caso del paesaggio il benessere viene dalla visuale che si gode, dall'immersione nel verde, dal paesaggio sonoro. La piazza-gabbia acustica, di cui si è detto sopra, è la negazione del paesaggio, che deve essere pensato, rispettato e, se necessario, progettato per essere sempre più vicino alla realtà dei fruitori. La suddivisione in sub-aree aiuta la fruizione delle diverse categorie di utenti con esigenze diversificate tra loro, senza criteri di rigidità, perché si mantiene la comunicazione attraverso un percorso comune dal tracciato sinuoso.

Nel caso di Piazza della Vittoria, i quattro settori corrispondono alle "categorie di utenza" (bambini, ragazzi, studenti del liceo e anziani), e costituiscono delle entità di fruizione peculiare, vere e proprie "piazze nella piazza" contraddistinte funzionalmente ed acusticamente. Sono nate così: "La piazza del Dante", dedicata agli studenti del Liceo omonimo; "La piazza del gioco", con installazioni di giochi che stimolano anche nei più piccoli il fenomeno della percezione sonora; "La piazza dei ragazzi", ove si può giocare a calcio in modo acusticamente (e non solo) compatibile; "La piazza del suono", dove ci si può fermare e rilassarsi godendo di un paesaggio sonoro studiato appositamente per la lettura e il relax.

L'architettura sonora delle installazioni previste è stata pensata con riferimento alle diverse aree di ascolto collegato alla fruizione: ad esempio il quadrante denominato "piazza del Dante" sul quale, oltre al Liceo, si affacciano i pubblici esercizi destinati alla somministrazione di colazioni, panini, ecc., viene pensato come luogo destinato all'incontro, con l'introduzione di panchine circolari raccolte intorno a un "focolare sonoro". Questo è rappresentato dalla scultura sonora denominata Sphera, prodotta e programmata ad hoc da

B&C Speakers e Architettura Sonora Applied Acoustics, che sono partner del progetto. La forma delle panchine il cono di diffusione della scultura sonora, il calore e il "colore" della musica invitano all'incontro e alla socializzazione. Le sculture sonore utilizzate, sono degli oggetti dal design geometricamente semplice che nascondono dei diffusori sonori collegati a un software capace di analizzare il paesaggio sonoro in tempo reale e di conseguenza modulare le composizioni sonore, al fine di corrispondere a specifiche esigenze acustiche. Nella figura 12 si nota la presenza di questi elementi nel rendering di questa parte della piazza.



Nelle figure 13, 14 e 15 sono riportati alcuni rendering di altre due "piazze nella piazza".



Figura 13: Rendering progettuale della "piazza del gioco"



Figura 14: Rendering progettuale della "piazza del suono"

CONCLUSIONI

La progettazione acustica deve essere inclusa in un più generale approccio di management integrato della progettazione urbana. I Piani d'Azione delle città devono avere fra gli obiettivi prioritari quelli di preservare le aree quiete dall'incremento di rumore.

L'approccio basato sul soundscape può costituire una buona soluzione per la progettazione delle aree quiete, considerando non solo i vincoli numerici della normativa, ma anche il comfort acustico dei luoghi.

L'intenzione degli autori è quella di spostare l'attenzione di progettisti e architetti del paesaggio urbano verso un approccio di pianificazione partecipata, teso alla riqualificazione degli spazi, alla valorizzazione degli elementi sonori come veicolo per la socializzazione, nonché a rendere gli spazi sonori urbani, elementi centrali della qualità sociale ed estetica delle nostre città.

In particolare nello studio di caso di Piazza della Vittoria si è sperimentato l'utilizzo dei soundscapes come componente attiva della correzione acustica non solo legata al mascheramento del rumore prodotto dalle sorgenti esterne allo spazio di fruizione ma anche come vero e proprio valore aggiunto per l'ottimizzazione della fruizione stessa. L'installazione di sculture sonore all'interno dei diversi spazi di fruizione che caratterizzano i quattro quadranti della piazza porta infatti a una correzione attiva del clima acustico incentivando la presenza antropica peculiare di un quadrante e limitando il disturbo proveniente dall'esterno e dai quadranti adiacenti.

BIBLIOGRAFIA

1. Directive 2002/49/EC of the European Parliament relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal of the European Communities L 189/12, 2002
2. R. M. Schafer "Our sonic environment and the soundscape: The tuning of the world", Destiny Books, Rochester, 1977.
3. D.L. Sackett et al., "Evidence based health: what it is and what it isn't" British Medical Journal, 1996
4. P. Lercher, B. Schulte-Fortkamp, "The relevance of soundscape research for the assessment of annoyance". Proceedings of 8th ICBEN, Rotterdam, 2003
5. R.Kull, "Natural and Urban Soundscapes" Acta Acustica United With Acustica Vol. 92, 2006.
6. R.Kim, "Burden of Disease from Environmental Noise" WHO International Workshop on "Combined Environmental Exposure: Noise, Air Pollutants and Chemicals" Ispra, 2007
7. European Environment Agency "Ensuring Quality of Life in Europe's Cities and Towns", 2008
8. J. Kang "Urban sound environment", Trevor & Francis, 2008
9. C. Marquis-Favre et al., "Noise and its effects – a review on qalitative apects of sounds" in Acta Acustica united with Acustica n.91, 2005
10. Piano d'Azione Strategico ai sensi del D.Lgs. 194/2005 dell'agglomerato di Firenze, 2009
11. Piano Comunale di Risanamento Acustico della città di Firenze, 2009
12. H. Wolfert "Noise in cities: general approach and European network solutions" in Proceedings of "European strategies for noise reduction and management",2009

ESPERIENZE E RIFLESSIONI SUL MONITORAGGIO A LUNGO TERMINE DEL RUMORE AMBIENTALE

Giovanni Brambilla, Patrizio Verardi

CNR-Istituto di Acustica "O.M. Corbino" (IA), Via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 Roma

SOMMARIO

Vengono presentate le analisi dei dati acustici ambientali, dominati prevalentemente dal traffico autostradale, acquisiti in quattro anni di funzionamento da una stazione di monitoraggio installata presso il CNR-IA. La grande quantità di dati disponibili ha permesso di calcolare il valore annuale di alcuni livelli sonori caratteristici e confrontarli con quelli ottenuti da campionamenti su base settimanale per valutarne la loro rappresentatività. Oltre ai dati acustici sono stati acquisiti anche quelli metereologici al fine di stimare l'influenza di questi sulla propagazione sonora. Mediante l'evoluzione temporale dello spettro è stato possibile discriminare e identificare gli eventi sonori dovuti a fenomeni atmosferici e ad altre sorgenti, quali i sorvoli di aerei. La positiva esperienza acquisita con il sistema di monitoraggio e la trasmissione dati tramite rete GPRS suggerisce, tuttavia, alcuni possibili sviluppi per aumentare la versatilità del sistema. Tra questi l'opportunità di un software residente su PC locale che permetta all'operatore di gestire direttamente l'acquisizione dei dati senza dipendere da un server centrale remoto, l'ampliamento della memoria del router per evitare la perdita di dati conseguente alla temporanea interruzione della rete GPRS e la registrazione audio digitale di eventi sonori, con intervento a soglia, per agevolare l'identificazione della sorgente sonora che li ha prodotti.

INTRODUZIONE

Il considerevole e progressivo sviluppo della strumentazione per la misura e l'analisi del rumore ambientale, che ha reso disponibili apparecchiature sempre più compatte e versatili con notevoli potenzialità, congiuntamente al rilevante progresso delle tecniche di trasmissione dati (internet, GPRS, wireless, ecc.) hanno permesso la realizzazione di unità di monitoraggio acustico affidabili e gestibili con rapidità anche quando configurate in rete tra loro.

I campi di applicazione di queste unità sono molteplici. Quello più frequente è la sorveglianza dell'immissione sonora di sorgenti specifiche che può richiedere l'installazione permanente di una o più unità per tempi anche lunghi (ad es. il monitoraggio del rumore da sorvolo nelle aree circostanti gli aeroporti o di quello prodotto da cantieri di grandi infrastrutture), come anche installazioni temporanee per tempi medi, ad esempio settimanali, di impiego sempre più diffuso.

Rilevamenti a medio-lungo termine del rumore ambientale consentono, tra l'altro, di valutare la variabilità dell'emissione sonora delle sorgenti che concorrono alla rumorosità nel sito e, se associati a rilevamenti dei parametri meteorologici, determinare l'influenza delle condizioni meteoclimatiche sulla propagazione sonora. L'importanza di questa influenza è riconosciuta anche nel D.Lgs. 194/2005 [1] di recepimento della direttiva europea 2002/49/CE [2] sulla determinazione e gestione del rumore ambientale, ove è richiesto che i valori dei descrittori L_{den} (livello giorno-sera-notte) e L_{night} (livello notturno) siano rappresentativi su base annuale.

L'installazione al CNR-IA di una unità di monitoraggio acustico della SCS Controlli e Sistemi, operativa con continuità dal 11 gennaio 2006, ha permesso di acquisire un ingente insieme di dati sulla rumorosità ambientale del sito, determinata prevalentemente da rumore autostradale.

Con questo lavoro, a partire dall'analisi dei dati acustici acquisiti nei quattro anni di funzionamento, si vogliono indicare le molteplici potenzialità di analisi offerte da questi sistemi di monitoraggio acustico, le criticità riscontrate e le auspicabili linee di ulteriore sviluppo.

SISTEMA DI MONITORAGGIO E SITO DI INSTALLAZIONE

Il sistema di monitoraggio, già descritto in precedenza [3], è stato installato a 245 m da un tratto rettilineo dell'autostrada A1 Roma-Napoli, in un'area priva di ostacoli alla propagazione sonora (vedi Figura 1) con terreno pianeggiante, prevalentemente poroso, e presenza di rari eventi sonori (sorvoli) non attribuibili al traffico autostradale. Quest'ultimo, pertanto, è la sorgente predominante nella rumorosità ambientale del sito.

La conformazione del sito e la distanza della autostrada consentono anche una valutazione dell'influenza delle condizioni meteoclimatiche sulla propagazione sonora in ambiente aperto. A tale scopo da dicembre 2007 è stata installata una stazione di rilevamento meteo DAVIS Vantage Pro2™, posizionata accanto alla unità di monitoraggio acustico. I dati meteo ed acustici (spettro a 1/3 di ottava e livello globale L_A acquisiti ogni secondo), insieme allo streaming video di una telecamera orientata verso l'autostrada sono visualizzati in tempo reale su sito web di pubblico accesso, consultabile all'indirizzo http://www. citynoise.net/ homes/idac (vedi Figura 2).

L'analisi dei dati anemometrici ed acustici per condizioni meteo favorevoli alla propagazione sonora ha già fornito risultati interessanti [4].

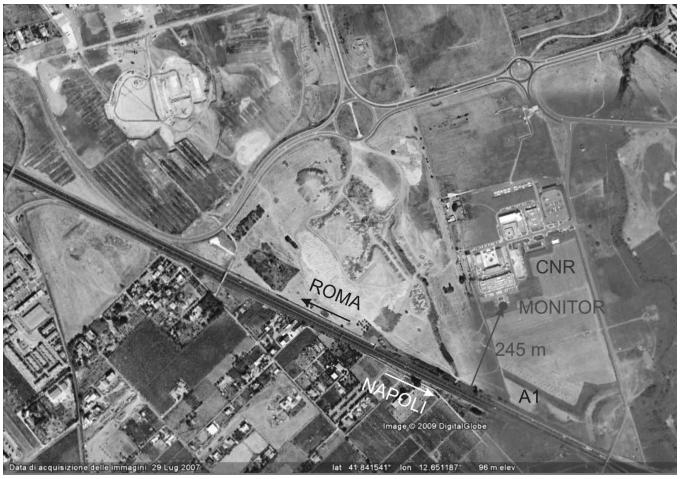


Figura 1: Foto aerea del sito oggetto del monitoraggio acustico

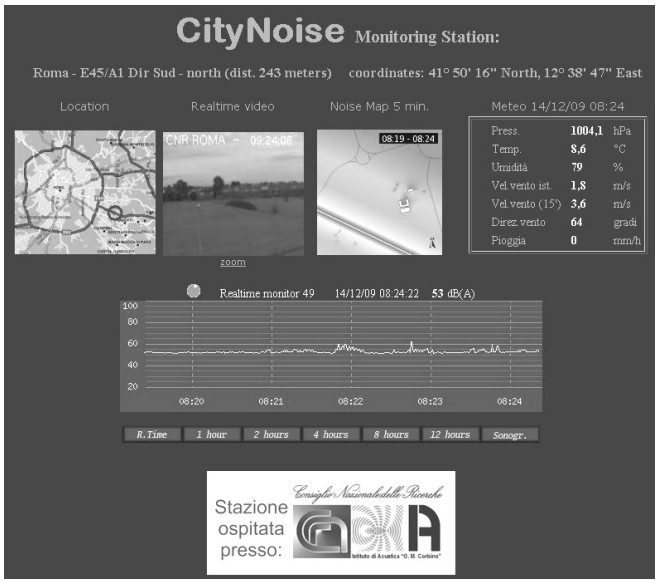


Figura 2: Pagina iniziale web (http://www.citynoise.net/homes/idac) con i dati meteo ed alcuni dei dati acustici rilevati

VARIABILITÀ TEMPORALE DEL RUMORE AMBIENTALE

In virtù del monitoraggio acustico continuo, anche se interrotto per alcuni periodi per le necessarie operazioni di manutenzione e di calibrazione e per la carenza di dati non memorizzati a seguito di mancata trasmissione su GPRS, è stato possibile acquisire un ingente insieme di dati acustici (vedi Tabella 1) e determinare il valore annuale di alcuni livelli sonori in dB(A), riportati in Tabella 2, comprendenti il livello giorno L_d, il livello sera L_e, il livello diurno L_{diurno}, il livello notturno L_{night} e il livello giorno-sera-notte L_{den}.

Come atteso, si osserva una sostanziale stazionarietà dei valori annuali, riportati per ciascun anno nella Figura 3 con la linea blu, diversamente dalle serie temporali dei valori giornalieri di L_{den} (linea nera) e della loro media mobile a 7 giorni consecutivi (linea rossa).

Nella Figura 4 sono riportate le serie temporali dei valori giornalieri di L_{den} (linea rossa) e di L_{night} (linea blu) rilevati per l'anno 2008 e i corrispondenti valori annuali (linee tratteggiate) per i quali si osserva una differenza di 7.4 dB(A). La correlazione tra i valori giornalieri di L_{den} e di L_{night} è pari a 0.92 per il 2008.

Tabella 1: Dimensione campionaria dei dati acustici acquisiti fino al 13/12/2009

Anno	L_d 06-22h	L_e 20-22h	L_{diurno} 06-22h	L_{night} 22-06h	L_{den} 06-24 e 00-06	Settimane 7 giorni consecutivi
2006 da 11/1	304	316	304	309	298	39
2007	361	364	361	354	350	44
2008	356	361	356	343	339	40
2009 fino a 13/12	295	307	295	278	266	27

Tabella 2: Valori annuali dei descrittori acustici considerati

Anno	L_d 06-22h	L_e (+5dB(A) 20-22h	L_{diurno} 06-22h	L_{night} 22-06h	L_{den} 06-06
2006 da 11/1	56.7	59.3	56.4	51.0	58.8
2007	56.2	58.9	55.9	51.0	58.6
2008	56.6	59.3	56.4	52.0	59.4
2009 fino a 13/12	55.9	59.0	55.7	51.6	59.0

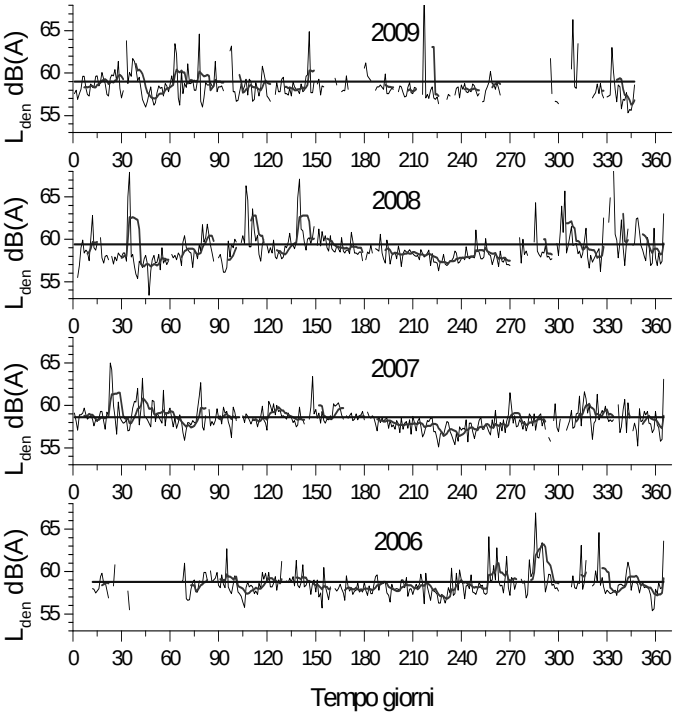


Figura 3: Serie temporali dei valori giornalieri di L_{den} (linea nera) e della loro media mobile a 7 giorni consecutivi (linea rossa), confrontate con il valore annuo (linea blu) per i quattro anni di monitoraggio

L'analisi dell'insieme dei dati giornalieri di L_{den} su base mensile, i cui risultati sono sintetizzati nel box plot in Figura 5, evidenzia una differente variabilità nei vari mesi con interquartili (IQR) compresi tra 0.9 e 3.9 dB(A), estremi corrispondenti rispettivamente ai mesi di luglio e dicembre.

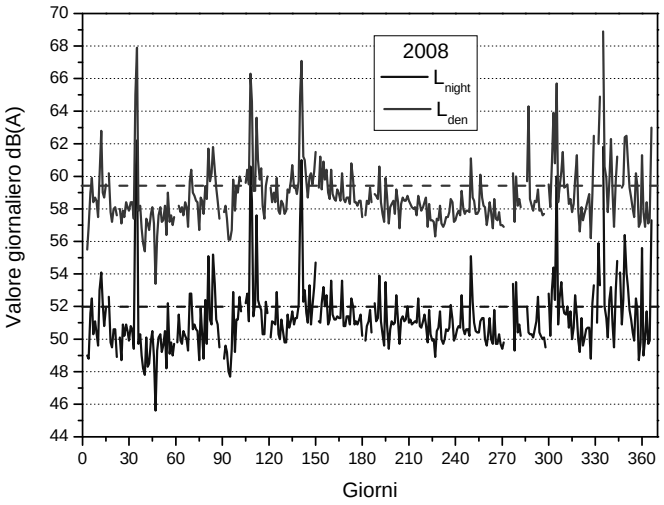


Figura 4: Serie temporali dei valori giornalieri di L_{den} (linea rossa) e L_{night} (linea blu) per l'anno 2008 e corrispondenti valori annuali (linee tratteggiate)

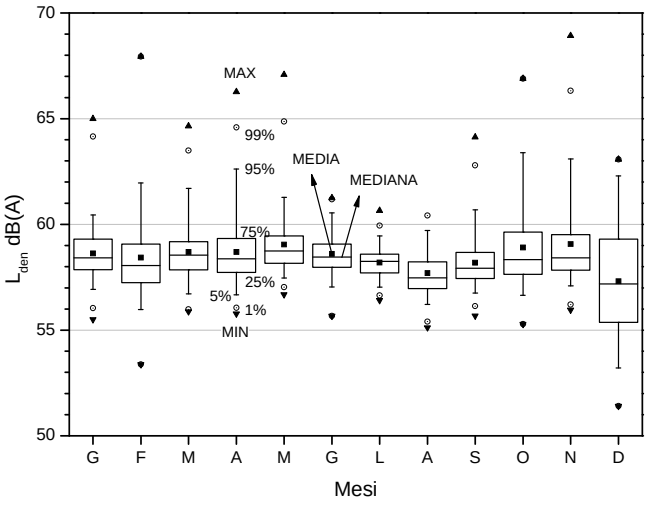


Figura 5: Box plot su base mensile dei dati giornalieri di L_{den} acquisiti nei quattro anni di monitoraggio

Gli andamenti nell'arco delle 24 ore e per ciascun giorno della settimana dei valori medi dei livelli equivalenti orari L_{Aeqh}, riportati nella Figura 6, risultano abbastanza simili tra loro per i giorni feriali (dal lunedì al venerdì), mentre sono chiaramente diversi per il sabato e la domenica, presentando livelli minori nella mattina e maggiori dalle ore 21 alle 02, come mostrato anche dal confronto degli andamenti medi per i giorni feriali (linea rossa a tratti e punti) e per il fine settimana (linea nera a tratti e punti). Confrontando questi andamenti medi con i valori annuali dei livelli L_{diurno} e L_{night} riportati in Tabella 2, si evince che i valori orari di L_{Aeqh} rilevati nei giorni feriali sono più idonei come estimatori dei valori annuali e, in particolare, tali risultano le ore 10 e 15 per il livello L_{diurno} e le 23 per L_{night}. Ovviamente la generalizzazione di queste considerazioni richiede molta cautela essendo specifiche per il sito esaminato.

CAMPIONAMENTO TEMPORALE DEL RUMORE AMBIENTALE

Il D.M. Ambiente 16/3/1998 [5] prescrive che il monitoraggio del rumore stradale sia eseguito per un tempo di misura non inferiore ad una settimana. Considerando questa costituita da 7 giorni consecutivi, con i dati acquisiti per le 150 settimane disponibili nel database è stato possibile valutare l'errore conseguente all'assumere il valore settimanale di L_{den} come estimatore del valore annuo.

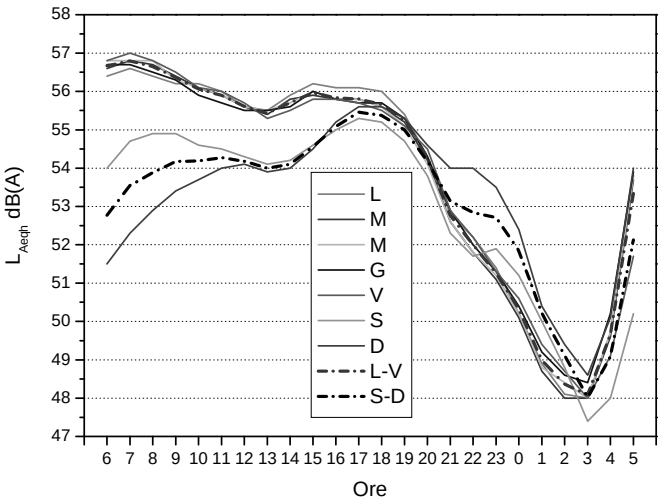


Figura 6: Andamenti nelle 24 ore dei valori medi dei livelli L_{Aeqh} per i vari giorni della settimana e per i giorni feriali (linea rossa a tratti e punti) e il fine settimana (linea nera a tratti e punti)

Si osserva che il 64.7% dei valori di L_{den} settimanale è inferiore al valore annuo, con una netta prevalenza (46%) nell'intervallo tra - 1 e 0 dB(A), come riportato nello istogramma in Figura 7 al quale è sovrapposta la curva di distribuzione normale che interpola i dati sperimentali. Solo il 32.7% dei 150 valori di L_{den} settimanale forniscono una stima del valore annuo di L_{den} con un'accuratezza compresa in ± 0.5 dB(A).

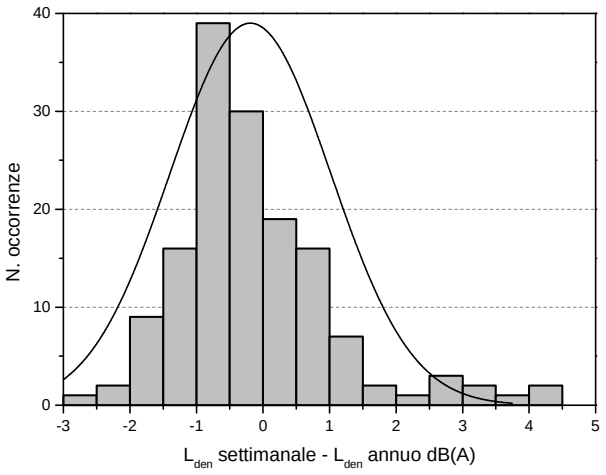


Figura 7: Distribuzione delle differenze tra i 150 valori settimanali e i valori annui di L_{den} ed interpolazione con la distribuzione normale

Per una analisi più dettagliata, le differenze dei valori settimanali ed annui di L_{den} sono state esaminate su base trimestrale, ottenendo il box plot riportato nella Figura 8. Appare evidente come, nel sito esaminato, il trimestre aprile-giugno sia quello più appropriato per la stima del valore annuo di L_{den} in quanto il 38.5% di valori di L_{den} settimanale fornisce una stima con un'accuratezza compresa in ± 0.5 dB(A), valore mediano di - 0.2 dB(A) e interquartile pari a 1.1 dB(A).

Precedenti indagini [6, 7] hanno mostrato l'utilità di un rilevamento settimanale discontinuo, ossia per 7 giorni non consecutivi distribuiti più o meno uniformemente nell'anno o,

comunque, nel periodo di osservazione. Questa modalità di campionamento rende più probabile il rispetto durante il rilevamento dei requisiti richiesti dal D.M. Ambiente 16/3/1998 [5] per le condizioni meteorologiche e, nel contempo, fornisce stime del valore di L_{Aeq} per l'intero periodo di osservazione con un'accuratezza paragonabile a quella conseguibile con un monitoraggio continuo per una intera settimana.

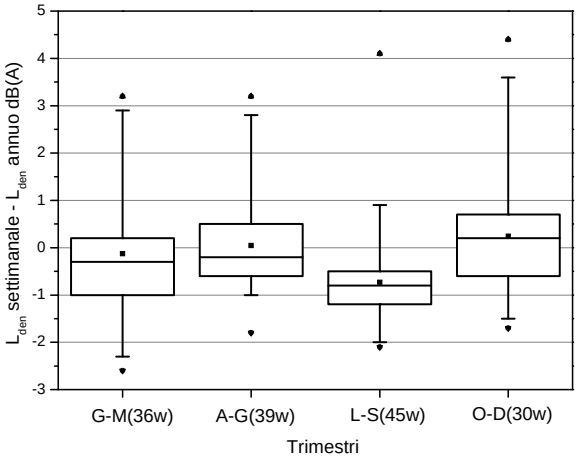


Figura 8: Distribuzione su base trimestrale delle differenze tra i valori settimanali ed annui di L_{den}

In considerazione dell'ingente insieme di dati disponibili per i valori giornalieri di L_{den} era impraticabile considerare tutte le settimane discontinue ottenibili dalle possibili combinazioni dei 7 giorni (208^7). In alternativa si è preferito un approccio statistico determinando per ciascuno dei 4 anni i valori corrispondenti ai percentili 95, 90, 75, 50, 25, 10 e 5 dei dati giornalieri di L_{den} distinti per giorno della settimana e ad aggregare i dati così ottenuti su base settimanale per ottenere gli omologhi valori settimanali di L_{den}. Questi ultimi valori sono stati confrontati con i rispettivi valori annui di L_{den} e le differenze ottenute, in termini di valore assoluto |ε| in dB(A), sono state raggruppate in intervalli di ampiezza crescente a step di 1 dB da ± 0.5 a ± 2.5 dB(A).

Nella Figura 9 è riportata la probabilità dell'errore |ε| per la stima del valore annuo di L_{den} dal suo valore settimanale ottenuto dal rilevamento per una settimana continua (curva nera) e discontinua (curva rossa). Le curve tratteggiate comprendono l'intervallo di confidenza al 95% per i valori previsti dalla curva di interpolazione dei dati sperimentali. Si osserva che la settimana discontinua, pur mostrando probabilità inferiori a parità di |ε|, presenta un intervallo di confidenza meno ampio e interamente contenuto in quello corrispondente alla settimana continua.

RICONOSCIMENTO DI EVENTI ACUSTICI

L'acquisizione ogni secondo dello spettro a bande di 1/3 di ottava (12-20000 Hz) del rumore ambientale fornisce informazioni preziose per l'individuazione delle sorgenti sonore e degli eventi che concorrono al rumore ambientale. Nella Figura 10 sono riportati gli andamenti nel tempo del livello complessivo in dB(A) e i sonogrammi rilevati in assenza di vento e di pioggia durante 10 minuti nella notte (Figura 10a), ove è possibile individuare il transito dei singoli veicoli, e nella mattina (Figura 10b), dove l'identificazione dei transiti è impossibile a seguito dell'elevato flusso veicolare.

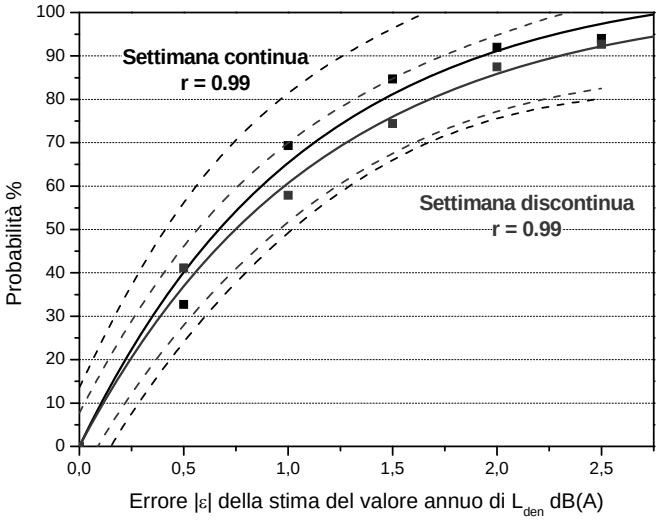


Figura 9: Probabilità dell'errore |ε| della stima del valore annuo di L_{den} dal valore per settimana continua (curva nera) e discontinua (curva rossa) ed intervalli di confidenza del valore previsto (curve tratteggiate)

La predominanza delle basse frequenze (bande da 31,5 a 63 Hz) è evidente, così come la presenza di componenti fino a 1 kHz dovute al transito dei veicoli e di altre occasionali componenti a 4-8 kHz nella mattina imputabili al cinguettio di uccelli.

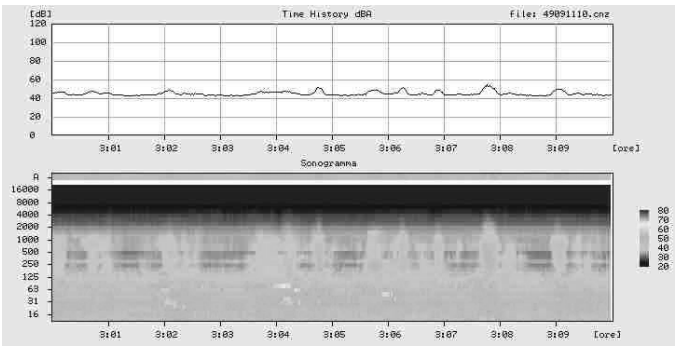


Figura 10a: Andamenti nel tempo del livello complessivo in dB(A) e sonogramma rilevati in assenza di vento e di pioggia dalle ore 3:00 alle ore 3:10

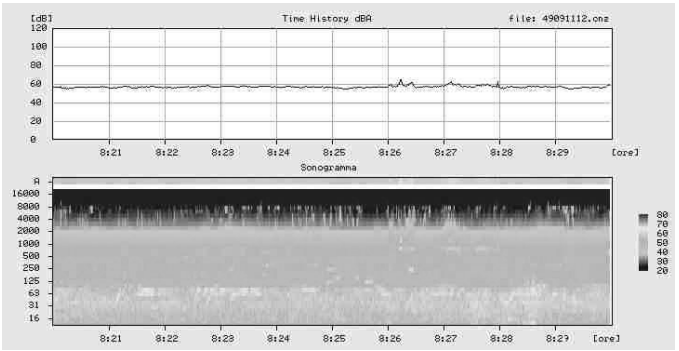


Figura 10b: Andamenti nel tempo del livello complessivo in dB(A) e sonogramma rilevati in assenza di vento e di pioggia dalle ore 8:20 alle ore 8:30

Il monitoraggio in continuo ha permesso anche di rilevare il rumore ambientale in condizioni meteorologiche non rispondenti ai requisiti del D.M. Ambiente 16/3/1998 [5], ossia in presenza di pioggia e velocità del vento superiore a 5 m/s. L'influenza di quest'ultima sullo spettro del rumore

ambientale per direzioni del vento favorevoli alla propagazione sonora è stata già oggetto di un precedente studio [4], come riportato nei risultati sintetizzati nella Figura 11.

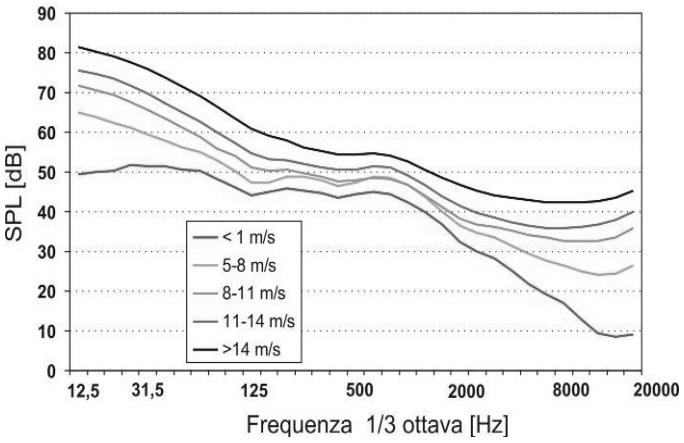


Figura 11: Spettri medi del rumore ambientale per classi di velocità del vento favorevole alla propagazione sonora confrontati con quello a velocità del vento inferiore a 1 m/s (linea rossa) [4]

Un esempio di sonogramma rilevato in assenza di pioggia e presenza di vento con velocità di 10-12 m/s e è riportato nella Figura 12. Sono evidenti le intense componenti a bassa frequenza (fino a 125 Hz) e quelle a frequenza medio-alta (50-60 dB fino a 16 kHz).

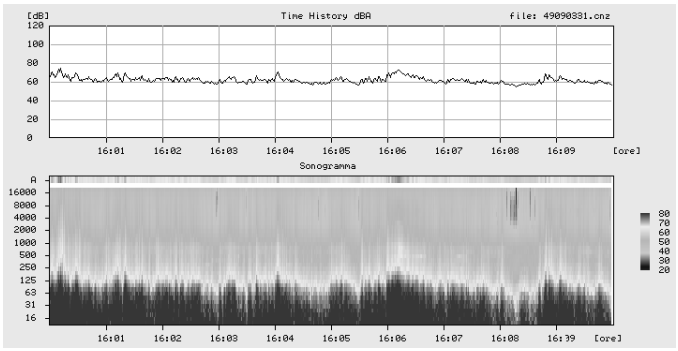


Figura 12: Andamenti nel tempo del livello complessivo in dB(A) e sonogramma rilevati in presenza di vento con velocità di 10-12 m/s

Lo spettrogramma in Figura 13 è stato rilevato in presenza di vento con velocità di circa 4 m/s e pioggia con intensità di 3 mm/h (dalle 1:20 alle 1:27) e superiore a 30 mm/h (dalle 1:27 alle 1:30). Si osserva la presenza di componenti ad alta frequenza (intorno a 2 kHz) che, all'aumentare della precipitazione, divengono più intense e si estendono fino a 8 kHz.

Nella Figura 14 è riportato il sonogramma di un tuono ravvicinato preceduto da tuoni in lontananza. Si osserva l'impulso sonoro che interessa l'intero spettro con livelli elevati al quale seguono spettri con componenti di intensità decrescente dalle alte frequenze.

Tra gli altri eventi sonori rilevati durante il monitoraggio si segnalano gli sporadici sorvoli di aerei. Un esempio al riguardo è riportato nel sonogramma in Figura 15 nel quale è chiaramente distinguibile il sorvolo, con associato lo shift verso le basse frequenze prodotto dall'effetto Doppler, rispetto agli spettri con presenza di vento.

Le varie modalità di rappresentazione dei dati acustici acquisiti comprendono anche il calcolo dei livelli percentili in

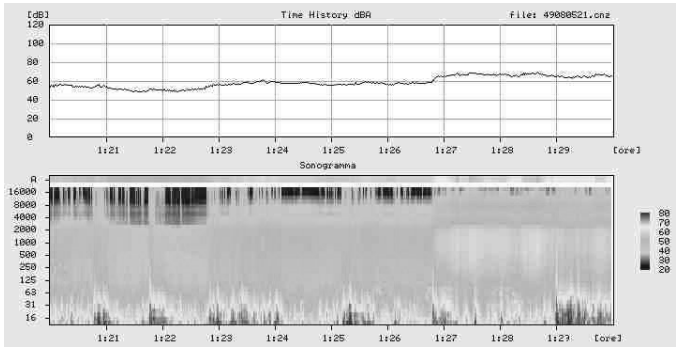


Figura 13: Andamenti nel tempo del livello complessivo in dB(A) e sonogramma con velocità del vento di 4 m/s e pioggia con intensità di 3 mm/h (1:20-1:27) e superiore a 30 mm/h (1:27-1:30)

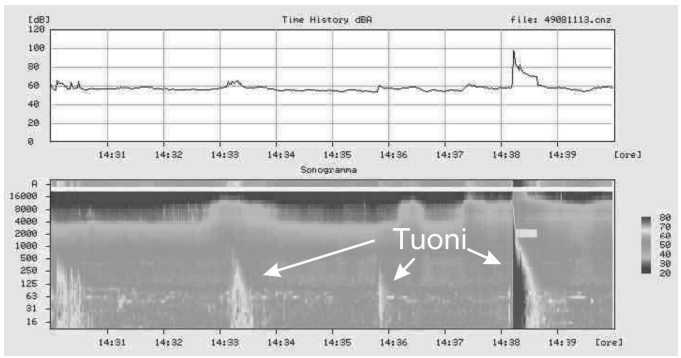


Figura 14: Sonogramma di tuono ravvicinato preceduto da tuoni lontani

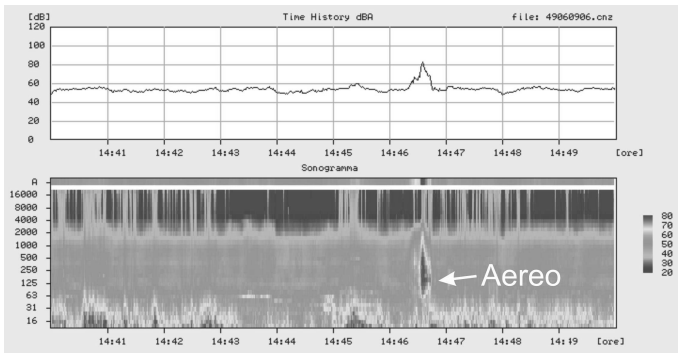


Figura 15: Sonogramma di un sorvolo di aereo

funzione del tempo e per bande di frequenza. Un esempio al riguardo è riportato nella Figura 16 che mostra l'andamento di alcuni livelli percentili per bande di frequenza nell'intervallo orario comprendente il sonogramma della Figura 10b.

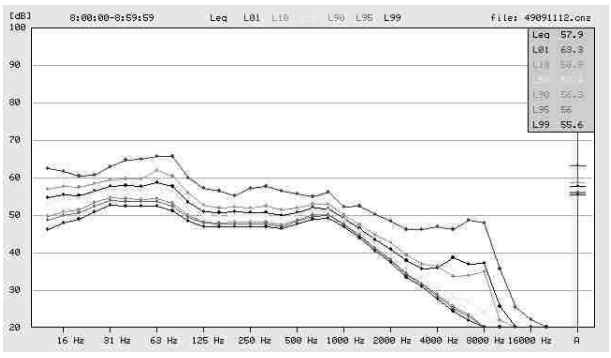


Figura 16: Livelli percentili per bande di frequenza nell'ora comprendente il sonogramma di Figura 10b. L_1 e L_{10} evidenziano gli occasionali eventi sonori dovuti al cinguettio degli uccelli

Gli esempi sopra illustrati mostrano l'utilità dell'acquisizione degli spettri di rumore con risoluzione temporale di 1 s non solo ai fini della sorveglianza e della identificazione delle sorgenti, ma anche per il consolidamento delle conoscenze e l'ampliamento delle basi dati necessarie per lo sviluppo di algoritmi finalizzati al riconoscimento automatico delle sorgenti sonore [8].

OSSERVAZIONI E POSSIBILI LINEE DI SVILUPPO FUTURO

Il sistema di monitoraggio impiegato dispone di un router per l'invio dei dati, mediante rete GPRS, al server remoto per la loro memorizzazione. Per sopperire alle possibili inefficenze del canale di trasmissione dati il router è dotato di un buffer per memorizzare temporaneamente i dati non inviabili sulla rete non operante e riprendere automaticamente la loro trasmissione al ripristino della rete stessa. Il sistema è attualmente in grado di memorizzare al suo interno i dati per 20 minuti ed è auspicabile che questa capacità di memorizzazione sia estesa ad almeno 1 ora per evitare la perdita di dati. Altrettanto utile sarebbe l'aggiornamento automatico dell'orario al cambiamento solare/legale.

Il server remoto con database MySQL per la memorizzazione dei dati e software Apache per la loro pubblicazione su pagina web, pubblica o con credenziali di accesso, è fondamentale per il controllo remoto in tempo reale del corretto funzionamento dell'unità di acquisizione dati.

Altre utili funzionalità sono la creazione automatica di rapporti periodici, giornalieri o per intervalli preimpostati, e il loro invio per posta elettronica, così come l'impostazione di soglie acustiche al superamento delle quali viene inviato un SMS di avviso ad una o più utenze telefoniche preimpostate. Questi SMS dovrebbero riguardare anche la segnalazione del numero di campioni memorizzati quando inferiore ad una soglia impostatibile, dipendente anche dalla risoluzione temporale di acquisizione. In tal modo l'utente è avvisato della perdita di dati quando superiore alla soglia predefinita come accettabile. È auspicabile che tutte queste importanti funzioni siano implementate anche su un software residente su PC locale in modo che l'utente possa direttamente operare sul sistema senza ricorrere al server remoto.

Relativamente all'elaborazione post-processing le funzioni presenti nei software già in commercio sono sufficienti per una completa analisi e documentazione sia del rumore ambientale, su periodi e risoluzioni temporali impostabili dall'utente, sia degli eventi sonori, in particolare la loro ricerca e valutazione selettiva anche per tipologia di sorgente sonora.

Per agevolare e rendere più efficiente la validazione dei dati è auspicabile che anche in questi sistemi di monitoraggio sia implementata la funzione di registrazione audio digitale degli eventi su condizione, già disponibile sugli attuali misuratori di livello sonoro.

CONCLUSIONI

L'impiego di un sistema di monitoraggio in tempo reale come quello descritto presenta molteplici funzionalità. Tra queste si segnalano in particolare:

a) la memorizzazione di grandi quantità di dati, eliminando completamente i problemi dovuti alla limitazione di memoria disponibile in campo e al periodico scaricamento dei dati;

b) la visualizzazione in tempo reale dei dati acquisiti dalla unità di monitoraggio su pagina web, pubblica o con credenziali di accesso, che consente il controllo remoto del regolare funzionamento dell'unità stessa;

c) la pubblicazione sul web di rapporti periodici dei dati acustici, previa loro validazione, che costituiscono un utile strumento per l'informazione del pubblico secondo quanto richiesto dal D.Lgs. n. 194/2005;

d) la identificazione degli eventi sonori e delle sorgenti che concorrono al clima acustico nel sito monitorato, agevolando la sorveglianza dell'immissione sonora di sorgenti specifiche e la loro associazione ad eventuali superamenti dei valori limite; per agevolare e aumentare l'efficenza dell'identificazione è auspicabile che sia implementata la funzione di registrazione audio digitale degli eventi su condizione;

e) il rilevamento dei parametri meteorologici in sincrono con i dati acustici, consigliato essendo il monitoraggio solitamente non assistito.

Sarebbe opportuno che tutte le funzioni attualmente disponibili, e quelle implementabili, siano gestibili con un software residente su PC locale in modo che l'utente possa direttamente operare sul sistema senza ricorrere al server remoto, riducendo così i tempi di intervento e la perdita di dati.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano la SCS Controlli e Sistemi srl per avere concesso la stazione di monitoraggio acustico, l'impiego dei dati acquisiti e per l'assistenza fornita.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. D.Lgs. 19 agosto 2005 n. 194, Attuazione della direttiva 2002/49/CE relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale, *Gazzetta Ufficiale*, Serie generale n. 222, pp. 4-11, 23/9/2005.
2. Direttiva 2002/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 25 giugno 2002 relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale, *Gazzetta ufficiale delle Comunità europee*, L 189/12, 18/7/2002.
3. A. Cerniglia, G. Brambilla, P. Verardi, Real time noise monitoring: un approccio innovativo al monitoraggio acustico ambientale, Atti Convegno AIA 2006, ISBN 88-88942-13-0, pp. 69-74, Ischia, 2006.
4. G. Brambilla, C. Cornaro, P. Verardi, Analisi di dati anemometrici e di rumore ambientale, Atti VIII Congresso CIRIAF, ISBN 978-88-6074-180-6, pp. 21-26, Perugia, 2008.
5. Decreto Ministero dell'Ambiente 16 marzo 1998, Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico, *Gazzetta Ufficiale*, Serie generale n. 76, pp. 15-19, 1/4/1998.
6. G. Brambilla, A. Cerniglia, F. Lo Castro, P. Verardi, Stima dei livelli a lungo termine del rumore da traffico autostradale, Atti Convegno AIA 2007, ISBN 978-88-88942-20-3, paper 1C1, Firenze, 2007.
7. G. Brambilla, F. Lo Castro, A. Cerniglia, P. Verardi, Accuracy of temporal samplings of environmental noise to estimate the long-term L_{den} value, Proceedings Internoise 2007, paper 318, Instanbul, 2007.
8. B. Defréville, P. Roy, C. Rosin, F. Pachet, Automatic recognition of urban sound sources, Proceeding 120th AES Convention, Paris, France, 2006.

LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA VIBRAZIONI MECCANICHE PER I LAVORATORI DEL SERVIZIO DI IGIENE URBANA

Massimo Pera

Gesenu s.p.a. – Tel +39 075 5743314 Fax +39 075 5899732 – m.pera@gesenu.it

SOMMARIO

Il Decreto Legislativo n° 81/08 definisce gli obblighi riguardanti la valutazione del rischio da Vibrazioni meccaniche, la riduzione dello stesso, l'informazione e la formazione ed il controllo sanitario. Nel caso dei lavoratori impiegati nei servizi di igiene urbana, vi sono alcune mansioni particolarmente a rischio che devono essere opportunamente valutate, quali ad esempio gli autisti dei mezzi di raccolta e spazzamento. Le banche dati attualmente disponibili forniscono dei valori di riferimento per alcuni automezzi ed attrezzi manuali più comuni. La relazione affronta il tema della valutazione dei rischi da vibrazioni meccaniche condotta presso una delle principali aziende di igiene urbana. La valutazione è stata eseguita attraverso campagne di misurazioni condotte sul campo. I dati ottenuti sono stati valutati anche rispetto ai valori tabellari presenti sulle banche dati oggi disponibili.

1. INTRODUZIONE

Le vibrazioni meccaniche sono un agente di rischio che interessa sostanzialmente due distretti corporei, il sistema manobraccio (HAV, Hand-Arm Vibration) ed il tratto lombosacrale della colonna vertebrale (WBV, Whole Body Vibration). Il motivo di questa duplicità delle vibrazioni risiede nell'aspetto periodico delle vibrazioni e nella costituzione dell'organismo umano. Il rischio di esposizione a vibrazioni è un rischio tipicamente tecnologico e, come tutti i rischi di origine tecnologica, è in costante crescita. Questa crescita è stata così evidente negli ultimi anni, che la Comunità europea ha deciso di intervenire definendo un assetto normativo speciale con l'emanazione della direttiva 2002/44/CE [1].

Il recepimento di questa direttiva è avvenuto con il decreto legislativo n. 187/2005 [2]. Il 30 aprile del 2008 è stato pubblicato il decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81 [3], recentemente aggiornato e modificato dal decreto legislativo 3 agosto 2009 n. 106, che ha riunito tutte le norme giuridiche che si riferiscono alla sicurezza e alla salute nei luoghi di lavoro.

2. RELAZIONE

2.1 Definizioni e valori limite

Il decreto Legislativo 81 all'art. 200 definisce le grandezze in gioco nella valutazione del rischio da vibrazioni meccaniche:

a) vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio: le vibrazioni meccaniche che, se trasmesse al sistema mano-braccio nell'uomo, comportano un rischio per la salute e la sicurezza dei lavoratori, in particolare disturbi vascolari, osteoarticolari, neurologici o muscolari;

b) vibrazioni trasmesse al corpo intero: le vibrazioni meccaniche che, se trasmesse al corpo intero, comportano rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori, in particolare lombalgie e traumi del rachide;

c) esposizione giornaliera a vibrazioni A(8): [m/s²] è definito quale valore mediato nel tempo, ponderato in frequenza, delle accelerazioni misurate per una giornata lavorativa nominale di otto ore.

La ponderazione è diversa nel caso che si tratti di mano-braccio o di corpo intero.

Oltre ai valori limite di esposizione giornalieri, sono definiti i valori di azione, considerati come quei valori che fanno scattare tutta una serie di azioni, preventive e protettive, al superamento della relativa soglia.

Sono definiti altresì i valori limite su periodi brevi (di norma 1-2 minuti nel caso dell'esposizione del sistema mano-braccio e in 3-5 minuti nel caso del corpo intero), considerati come quei valori che, ancorché più elevati di quelli riconosciuti come limite, possono essere tollerati solo per tempi contenuti.

La Tab. 1 mostra i valori limite di esposizione e di azione previsti dalla normativa.

Tabella 1 – Valori limite di esposizione e valori di azione

	Valore d'azione (m/s²)	Valore limite (m/s²)	Valore limite su periodi brevi (m/s²)
Mano-braccio	2.5	5.0	20.0
Corpo intero	0.5	1.0	1.5

2.2 Descrizione del ciclo lavorativo

La GE.SE.NU. S.p.A. esegue il servizio di igiene urbana nel Comune di Perugia, oltre allo smaltimento dei rifiuti urbani prodotti.

I dipendenti che eseguono tali attività svolgono servizi di raccolta dei rifiuti urbani attraverso la funzione di autista alla guida di mezzi specifici quali:

- Compattatori a caricamento posteriore;
- Compattatori a caricamento laterale;
- Autocarri a cassone;
- Spazzatrici:
- Motocarri a sponda;
- Motocarri a vasca.

Sono stati inoltre valutati l'utilizzo di mezzi specifici per il trasporto dei rifiuti presso la discarica di Pietramelina quali semirimorchi autocompattanti e l'uso di mezzi d'opera quali pala meccanica, compattatore da discarica e ragno semovente.

L'uso dei mezzi sopra citati espone i lavoratori a vibrazioni trasmesse al solo corpo intero. Presso il solo impianto di selezione e riciclaggio di Ponte Rio si sono invece esaminate le attività svolte presso le varie officine che comportano l'utilizzo di attrezzature portatili, esponendo i lavoratori al rischio di vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio, con livelli di rischio riscontrati nella norma.

2.3 Valutazione del rischio

La valutazione dell'esposizione alle vibrazioni fa parte del documento di valutazione dei rischi previsto dall'art. 28 del D.L.vo 81/08.

Il modo più sicuro e preciso per individuare il livello di vibrazioni è quello di procedere a specifiche misure nelle condizioni effettive delle singole macchine o attrezzature utilizzate, adottando a tal fine le metodologie di cui alle norme ISO 5349-1 [5] e ISO 2631-1 [6], anche se, il D. L.vo 81/08 prevedeva la possibilità di ricorrere alle banche dati per il reperimento dei valori di accelerazione utili alla valutazione del rischio, ed in particolare alla banca dati dell'ISPESL [4], possibilità oggi esclusa dopo l'emanazione del D.L.vo 106/09.

2.4 Modalità di misura

Le misurazioni sono state eseguite durante l'utilizzo dei mezzi citati, tenendo conto sia del trasporto che del carico-scarico dei rifiuti, valutando l'esposizione in funzione dei percorsi abitualmente seguiti dai vari mezzi.

In alcuni casi si sono effettuate più misure con lo stesso mezzo, utilizzando poi per il calcolo dell'esposizione il valore più alto risultante, in altri casi, dove per lo stesso servizio si fa uso di più veicoli, si sono eseguite misure su più mezzi dividendo il tempo totale di esposizione tra gli stessi.

Gli intervalli di misura sono stati scelti in modo da osservare per ogni mezzo un intero ciclo di lavoro.

Sono state inoltre eseguite misure riguardanti la mansione di operatore addetto alla raccolta dei rifiuti che si trova in posizione eretta dietro all'automezzo di raccolta.

2.5 Strumentazione impiegata

Si è utilizzato un analizzatore Real Time SOUNDBOOK, che permette la misurazione in contemporanea su 3 canali secondo le curve di pesatura in frequenza per le misure sul sistema mano braccio ISO 5349-1 e corpo intero ISO 2631-1 applicabili sia sulle analisi spettrali che sulle tracce delle Time History, conforme alle richieste del D.Lgs. 81/2008.

Lo strumento utilizzato, mediante un software dedicato, consente di elaborare e rappresentare graficamente le misurazioni effettuate (Fig. 1).

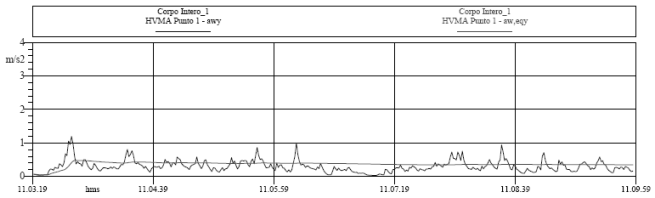


Figura 1 – Tracciato della Time history per il valore di accelerazione awy

2.6 Metodiche di misurazione del sistema mano-braccio

La valutazione del livello di esposizione alle vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio si basa principalmente sulla determinazione del valore di esposizione giornaliera normalizzato ad 8 ore di lavoro, A(8) (m/s²), calcolato sulla base della radice quadrata della somma ($a^2_{wx} + a^2_{wy} + a^2_{wz}$) dei valori quadratici medi delle accelerazioni ponderate in frequenza, determinati sui tre assi ortogonali x, y, z, in accordo con quanto prescritto dallo standard ISO 5349-1: 2001.

L'espressione matematica Eq. (1) per il calcolo di A(8) è di seguito riportata.

$$A(8) = \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} \cdot \sqrt{a_{wx}^2 + a_{wy}^2 + a_{wz}^2} \qquad (1)$$

dove:

Te : Tempo di esposizione effettiva alle vibrazioni (ore);

To : Tempo di riferimento pari a 8 ore;

a_{wx}, a_{wy} e a_{wz}: Valori r.m.s dell'accelerazione ponderata in frequenza (in m/s²) lungo gli assi x, y, z (ISO 5349-1: 2001).

La strumentazione utilizzata per la valutazione dei livelli di accelerazione è costituita da:

- Un'analizzatore di classe I
- Un accelerometro triassiale mano braccio

Gli accelerometri sono saldamente fissati su un adattatore per la mano che viene tenuto tra le dita dall'operatore o fissati, per mezzo di un adattatore a fascetta metallica o di plastica, direttamente sull'impugnatura dell'attrezzo, in stretta prossimità della posizione assunta dalle mani dell'operatore, nelle ordinarie condizioni operative. Essi sono posizionati in maniera che la loro presenza non influenzi le modalità di prensione e lavorazione normalmente adottate dall'operatore.

Durante le misurazioni si provvede a fissare il cavo alle braccia dell'operatore mediante un nastro adesivo, affinché non subisca sollecitazioni meccaniche, specialmente nelle immediate vicinanze del trasduttore, e non siano lasciati liberi di oscillare, per evitare artefatti nel segnale rilevato.

La valutazione delle vibrazioni al sistema mano braccio si riferisce all'impiego di attrezzi portatili, che non costituiscono la fonte di rischio principale nel settore dei servizi di igiene urbana e pertanto non sono state analizzate nel seguito della trattazione.

2.7 Vibrazioni trasmesse al corpo intero

La valutazione del livello di esposizione alle vibrazioni trasmesse al corpo intero si basa sulla determinazione del valore di esposizione giornaliera normalizzato ad 8 ore di lavoro, A(8) (m/s2), calcolato sulla base del maggiore dei valori numerici delle accelerazioni ponderate in frequenza, determinati sui tre assi ortogonali 1,4*a_{wx}, 1,4*a_{wy}, a_{wz} secondo la formula Eq. (2) di seguito riportata:

$$A(8) = \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} \cdot MAX\left[(1{,}4 \cdot a_{wx}); (1{,}4 \cdot a_{wy}); (1{,}0 \cdot a_{wz})\right] \quad (2)$$

dove:

Te : Tempo di esposizione effettiva alle vibrazioni (ore);

To : Tempo di riferimento pari a 8 ore;

a_{wx}, a_{wy} e a_{wz}: Valori r.m.s dell'accelerazione ponderata in frequenza (in m/s²) lungo gli assi x, y, z (ISO 2631-1: 1997).

Le misure sono effettuate sulla superficie di contatto tra il corpo e la sorgente di vibrazioni. L'accelerometro, usato per le misure di vibrazioni trasmesse al corpo intero, consiste in un disco rigido di gomma, con all'interno un accelerometro triassiale fissato, con nastro adesivo, sul sedile del mezzo di guida.

Contemporaneamente, viene acquisito per mezzo di un accelerometro monoassiale, anche il segnale sul pianale (pavimento) relativo all'asse Z per verificare l'esistenza di eventuali picchi causati dai movimenti dell'operatore sul sedile, estranei all'evento misurato.

L'esistenza di questi picchi nel segnale rilevato sul sedile è confermata dall'assenza di picchi nel segnale rilevato sul pavimento, negli stessi intervalli temporali di misura. Il segnale anomalo associato a questi eventi viene escluso dalla determinazione dei valori di accelerazione rilevati sul sedile lungo i tre assi di misura.

L'accelerometro monoassiale integrativo è fissato rigidamente alla base del sedile del posto di guida.

Il tempo totale di misura, vale a dire il numero di campioni acquisiti moltiplicato per il tempo di durata dell'acquisizione di ciascun campione, è di durata superiore almeno ai tre minuti. Per minimizzare l'effetto di possibili fattori interferenti sul segnale acquisito e garantire una migliore precisione di misura, quando possibile vengono acquisiti un maggior numero di campioni di breve durata, preferibili ad un solo campione con durata maggiore. Le misure sono di durata tale da poter individuare, in modo significativo, le caratteristiche delle vibrazioni trasmesse al corpo del lavoratore nelle tipiche condizioni operative (per esempio, tipologia del terreno, velocità di avanzamento). Nel caso in cui le condizioni operative varino in maniera significativa, dovranno essere caratterizzati, in termini di accelerazione rms ponderata in frequenza, differenti percorsi con differenti modalità operative.

2.8 Risultati ottenuti dalla valutazione

La Tab. 2 mostra i risultati delle misure di vibrazioni trasmesse al corpo intero eseguite sulle principali tipologie di veicolo impiegate in azienda, messe a confronto con i valori riportati sulla banca dati ISPESL qualora disponibili.

Si può osservare come i valori riscontrati risultino inferiori al valore di azione giornaliero, tranne quello relativo agli autisti delle spazzatrici, quelli inerenti gli autisti dei mezzi utilizzati per il trasferimento dei rifiuti in discarica Eurotrakker 440 e gli operatori che utilizzano i motocarri a pianale ed a vasca.

Va anche segnalato che i valori presenti nella banca dati ISPESL sono confrontabili con quelli misurati per le tipologie di automezzo con identiche caratteristiche. Tuttavia, si può osservare come per molti veicoli non esistono dati di riferimento.

Il superamento dei valori di azione richiede l'attivazione di un programma di sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti con una periodicità almeno annuale. Il medico competente può, con adeguata motivazione, variare questa periodicità, esponendo le sue motivazioni nel documento di valutazione dei rischi.

Tabella 2 – Risultati delle misure di vibrazioni trasmesse al corpo intero

Descrizione automezzo	1,4Awx (m/s^2)	1,4Awy (m/s^2)	1,0Awz (m/s^2)	ISPESL A(8) (m/s^2)	Riferimento automezzo banca dati ISPESL
Minicompattatore su Iveco Daily 49.12	0.26	0.47	0.48	-	-
Compattatore Farid MP19 su Iveco 175.24	0.28	0.38	0.47	-	-
Compattatore Farid su Iveco 150E18K	0.22	0.37	0.50	0.18	Comp.Rifiuti. Iveco 150E18
Compattatore Laterale Farid FMO su Iveco 260 E31	0.21	0.22	0.29	0.25	Comp.Rifiuti. Iveco Stralis 260E30
Compattatore Laterale Farid FMO su Iveco 190E30	0.23	0.38	0.31	0.27	Comp.Rifiuti. Iveco 190E30
Spazzatrice Ravo 5002	0.51	0.46	**0.58**	-	-
Spazzatrice Ravo 540	0.45	0.44	**0.53**	-	-
Spazzatrice Farid SP500 su telaio	0.35	0.49	0.40	0.21	Bucker SchorlingEuroFant 50
Ape Piaggio pianale	0.43	0.41	**0.80**	0.79	Ape Max Diesel
Ape Piaggio vasca	0.28	0.41	**0.54**	-	-
Piaggio Porter vasca	0.35	0.28	0.48	-	-
Operatore in pedana su autocarro	0.14	0.13	0.38	-	-
Compattatore discarica TANA 36F	0.24	0.35	0.21	0.21	Bomag 671
Motrice per semirimorchio Eurotrakker 440	0.33	0.40	**0.60**	-	-

3. CONCLUSIONI

La valutazione dei rischi per la salute dei lavoratori indotti dalle vibrazioni meccaniche non può prescindere da una campagna analitica di misurazioni condotte secondo le

metodiche previste dalle norme.

Le banche dati disponibili possono essere utili quali valori di riferimento, ma non consentono di ovviare alle misurazioni, in quanto non si ritrovano l'intera gamma di veicoli o di attrezzi portatili impiegati.

I rischi principali da vibrazioni meccaniche nel settore dei servizi di igiene urbana risiedono negli addetti alla guida di spazzatrici e motocarri, anche se i valori di vibrazione trasmesse al corpo intero cui i lavoratori sono esposti risultano decisamente inferiore ai valori limite. La conoscenza di queste sollecitazioni, variabili da veicolo a veicolo, dovrà essere comunque oggetto di valutazione da parte del datore di lavoro in occasione dell'acquisto di nuove attrezzature.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. «Direttiva 2002/44/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 6 febbraio 2003 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (vibrazioni) (sedicesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE)», in G.U.C.E. L del 6 luglio 2002, n. 177.
2. Decreto Legislativo 19 agosto 2005 n. 187 "Attuazione della direttiva 2002/44/CE sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti da vibrazioni meccaniche", G.U. n. 220 del 21.9.2005.
3. Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro", S.O. n. 108 alla G.U. n. 101 del 30.04.2008.
4. ISPESL Linee Guida per la Prevenzione del Rischio Vibrazioni (2001) scaricabile dal sito http://www.ispesl.it
5. Norma UNI EN ISO 5349-1: 2004 "Vibrazioni meccaniche. Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano – Parte 1: Requisiti generali".
6. International Organization for Standardization. Mechanical Vibration and skock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1: General requirements. ISO 2631-1:1997.

ASPETTI PROGETTUALI E BIOMECCANICI DI UN SEDILE PER MACCHINISTA FERROVIARIO (modello semplificato per la valutazione dell'esposizione a vibrazioni)

P.Pascolo[1], S.Grimaz[2,3], G. Franceschini[4]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile – Università degli Studi di Udine, via della Scienze 108, 33100 Udine
[2] Centro studi e ricerche SPRINT – Università degli Studi di Udine Via D'Aronco 2, 33100 Udine
[3] Dipartimento di Georisorse e Territorio – Università degli Studi di Udine, via Cotonificio 114, 33100 Udine
[4] Dipartimento Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Perugia, Perugia

SOMMARIO

L'utilizzo di utensili vibranti ma anche dei comuni mezzi di trasporto e l'impiego di veicoli e macchine per tempi prolungati conduce ad osservare l'insorgenza di patologie quali alterazioni vascolari, osteoarticolari e neuorsensoriali associate all'esposizione a vibrazioni meccaniche. Tali patologie sono correlate a tre aspetti o variabili: le caratteristiche della forzante vibratoria, il tempo di esposizione del soggetto (recettore) a tale forzante, la terza variabile, la più complessa da investigare, riguarda la modalità di interazione forzante-recettore, ossia il complesso degli eventi di natura biomeccanica a loro volta legati intimamente alla variabilità individuale, dunque non modellabili se non a grandi linee.

Il presente lavoro illustra un caso studio di valutazione dell'esposizione a vibrazioni del macchinista ferroviario che opera lungo una specifica tratta, a partire dalle entità delle vibrazioni prodotte sulla motrice in movimento lungo la stessa tratta.

Keywords: vibrazioni meccaniche, ergonomia, rischio, sicurezza, ferrovia, sedili.

1. IL PROBLEMA DELLA RISPOSTA DEL CORPO UMANO ALLE VIBRAZIONI

Le problematiche che insorgono per effetto della vibrazione sul corpo umano sono di diversa natura ed entità. Si può riscontrare un affaticamento con progressiva riduzione nelle capacità di svolgere un'attività oppure si possono generare come causa prima o come causa scatenante, specifiche patologie.

Si hanno varie tipologie di esposizione a vibrazioni meccaniche ad esempio:

1. Vibrazione del corpo intero - WBV (Whole Body Vibration)
2. Vibrazione del sistema mano-braccio - HAV (Hand Arm Vibration).

La vibrazione del corpo intero, di interesse per questo studio, si ha quando una sollecitazione meccanica di natura oscillatoria coinvolge l'organismo umano nella sua totalità. Questo è quanto avviene nei confronti di un manovatore che opera in posizione seduta su una motrice ferroviaria.

Il corpo umano, dal punto di vista meccanico, è un sistema di particolare complessità. Solo per sollecitazioni a frequenza inferiore a 0,5 Hz l'organismo si può, con qualche beneficio considerare una massa unica. Per sollecitazioni caratterizzate da uno spettro ampio distribuito nell'intervallo tra 0,5 e 100 Hz si ha che i diversi organi sono sottoposti a sollecitazioni differenziate che li inducono a compiere moti relativi l'uno rispetto all'altro. Per vibrazioni a frequenza superiore a 80 Hz si ha invece il coinvolgimento della sola zona superficiale, prossima all'area di ingresso, in quanto, le proprietà di attenuazione degli strati immediatamente sottostanti, provocano un rapido smorzamento della sollecitazione [7], va però detto che ciò è solo parzialmente vero, per esempio l'occhio ha una frequenza propria, a seconda dell'individuo, variabile da 60 a 100 Hz e così via.

La grandezza che viene presa in esame in questo studio è l'accelerazione.

Va segnalato che non è solo l'accelerazione, a rigore, a dover essere indagata, ma il suo andamento, non come sintesi (es. RMS) ma nel suo evolvere (picchi e loro consistenza temporale, tempi di esposizione complessivi, ecc.), va indagata la variabilità individuale e la relativa contingenza con i suoi aspetti neurologici, ecc..

Nell'ottica però di ragionare sull'individuo "medio" si osserva una diversa sensibilità del corpo umano alle componenti della vibrazione lungo le tre direzioni, al variare della frequenza.

La risposta del corpo sollecitato dipende dalla direzione d'azione della vibrazione. La sollecitazione verticale, che si trasmette dalla zona d'appoggio verso il capo per i soggetti in posizione eretta o seduta, provoca risposte differenti rispetto a quelle generate da una sollecitazione che agisce sul piano orizzontale. Pertanto, in un'ottica di valutazione dell'esposizione a rischio, il contributo delle componenti in frequenza per le quali la sensibilità è minore, dovrà essere ridotto proporzionalmente. La procedura, nel suo insieme, si sintetizza rappresentando un filtro di ponderazione, che opera attenuando i contributi energetici delle diverse frequenze che compongono il segnale, in maniera inversamente proporzionale alla sensibilità.

Definito però il sistema di riferimento, trattandosi di una grandezza vettoriale, la forzante può essere espressa attraverso le componenti nelle tre direzioni spaziali di un riferimento ortogonale O_{XYZ}, si "deve" adottare la ponderazione in frequenza per valutare l'effetto della vibrazione su un sistema la cui risposta alla sollecitazione varia con la frequenza. I filtri di ponderazione che si applicano per valutare l'effetto sulla salute di soggetti seduti per le componenti x, y e z sono riportati in Figura 1.

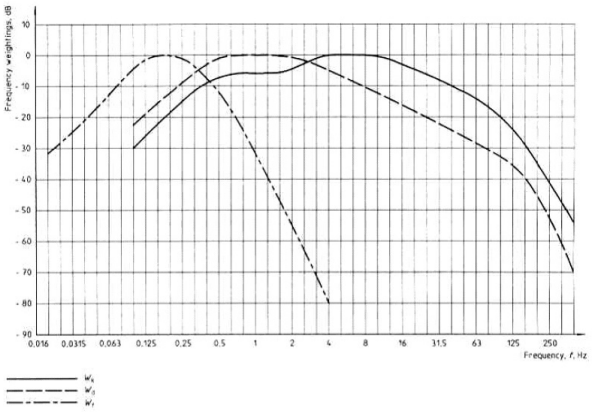


Figura 1: Curve dei filtri di ponderazione sui tre assi di misura

2. INQUADRAMENTO NORMATIVO

La problematica dell'esposizione a rischi da vibrazioni meccaniche trova il principale riferimento normativo nel D.Lgs 187/05, decreto di attuazione della Direttiva Europea 2002/44/CE sulle prescrizioni minime e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti da vibrazioni meccaniche.

La Direttiva Europea, nel caso di vibrazioni su corpo intero, si rifà alla metodologia di valutazione del rischio da vibrazioni descritto dalla normativa ISO 2631-1:1997 *"Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration"* che si basa sull'analisi dell'accelerazione ponderata in frequenza, calcolata a partire dalle accelerazioni misurate a livello struttura agente, in base al suo valore quadratico medio A_w:

$$A_w = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a_w^2(t)dt} \tag{1}$$

Tale quantità viene rilevata lungo ciascuna delle tre componenti assiali del vettore accelerazione, secondo un sistema di riferimento O_{xyz} definito nella norma.

Il calcolo del valore quadratico medio dell'accelerazione ponderata A_w viene effettuato pesando in frequenza le accelerazioni mediante opportuni filtri, definiti dalla norma stessa (Fig. 1), che si distinguono tra loro in funzione dell'asse lungo il quale viene misurata l'accelerazione.

Il valore di A_w viene poi determinato moltiplicando il valore quadratico medio dell'accelerazione ponderata in k, che per l'asse z la norma indica pari ad 1 per l'asse z, 1.4 per gli assi x e y e 0.8 per l'asse x sullo schienale.

Il criterio definito dallo standard ai fini della valutazione dell'esposizione a vibrazioni, si basa sull'assunzione che due esposizioni quotidiane a vibrazioni, di entità A_{w1} ed A_{w2} e di durata rispettivamente T_1 e T_2, siano equivalenti in relazione ai possibili rischi sulla salute quando vale:

$$A_{w1}T_1^{1/2} = A_{w2}T_2^{1/2} \tag{2}$$

Sulla base di tale principio (detto anche "principio dell'eguale energia"), l'esposizione a vibrazioni al corpo intero per un tempo di esposizione T_e si può quantificare mediante l'accelerazione equivalente ponderata in frequenza riferita ad otto ore lavorative, convenzionalmente denotata con il simbolo A(8).

$$A(8) = A_w\sqrt{T_e/8} \tag{3}$$

I criteri di valutazione definiti dall'annesso B dello standard ISO si basano sulla comparazione della quantità A(8) calcolata con l'Eq. 3, con curve che esprimono l'accelerazione opportunamente calcolata A_w in funzione del tempo di esposizione (Fig. 2).

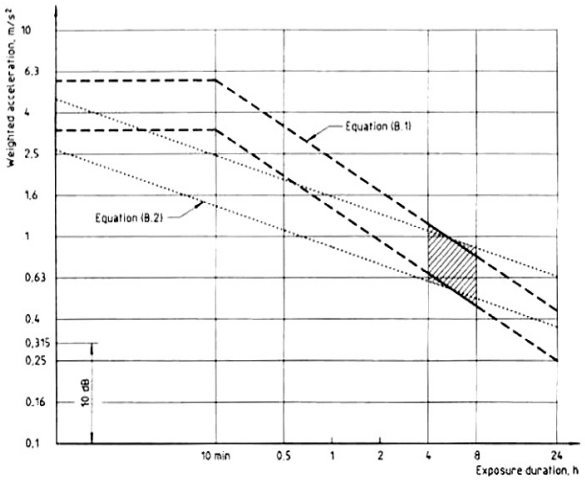


Figura 2: Curve che definiscono, per ciascuna durata di esposizione, i valori limite idonei a prevenire possibile effetti sulla salute

Tali curve individuano, per ciascuna durata di esposizione, valori limite di A(8) idonei a prevenire possibili effetti sulla salute a carico della colonna vertebrale per individui sani che siano esposti abitualmente a vibrazioni.

Il coefficiente A(8) comparato con tali curve che risultano essere valide in un certo intervallo di esposizione giornaliera fornisce le seguenti casistiche:

- se A(8) risulta essere inferiore a 0.47 m/s^2, per un esposizione continuativa di otto ore, allora non ci sono effetti documentati sulla salute;
- se A(8) risulta essere inferiore a 0.83 m/s^2, per un esposizione continuativa di otto ore, allora ci sono potenziali effetti sulla salute;
- se A(8) risulta essere superiore a 0.83 m/s^2, per un esposizione continuativa di otto ore, allora ci sono probabili effetti sulla salute.

La Direttiva europea 2002/44/CE [2] e il Decreto Legislativo n. 187 del 2005 [3] utilizzano per la valutazione della dose di vibrazioni la metodologia descritta dalla norma ISO 2631-1:1997, ma introducono delle variazioni sui limiti di esposizione, definendo:

- il *valore d'azione giornaliero* pari a 0.5 m/s^2 (invece di 0.47m/s^2 della ISO);
- il *valore limite di esposizione giornaliero* pari a 1.15 m/s^2 (invece di 0.83m/s^2 della ISO).

Nel caso di esposizione del corpo intero, la normativa prevede di considerare come valore di A(8) da confrontare con i limiti normativi massimo tra i seguenti valori: A(8) 1.4 in direzione x, A(8) 1.4 in direzione y, A(8) in direzione z.

Per verificare la presenza di componenti impulsive va calcolato il Fattore di Cresta (CF), come rapporto tra il picco massimo ed il valore RMS equivalente globale. Per CF < 9, la

valutazione dell'esposizione mediante l'A(8) risulta efficace; per CF > 9, la norma ISO 2631-1 raccomanda di valutare il massimo della media mobile (MTVV Maximum Transient Vibration Value) o la dose della quarta potenza (VDV fourth power Vibration Dose Value).

3. IL CASO DI STUDIO

Il presente lavoro illustra i risultati dello studio di un caso concreto di esposizione a vibrazioni meccaniche di un macchinista ferroviario nella sua postazione di guida.

Lo studio, di seguito descritto, è stato cosi strutturato:

- è stato costruito un modello di un sedile in ambiente ADAMS;
- è stata eseguita una misurazione sul campo delle accelerazioni in una motrice ferroviaria su una tratta di riferimento;
- è stata realizzata una formulazione delle sollecitazioni da introdurre nel modello e sono state eseguite le relative simulazioni.

Il problema è stato affrontato considerando anche l'interazione corpo-sistema forzante in modo da tale da tenere conto della varietà degli operatori esposti. In particolare è stato studiato un sedile per manovratore di motrice ferroviaria considerando quattro condizioni di carico corrispondenti a 60, 80, 100 e 130 kg di massa applicata sulla seduta che copre tutta la gamma di potenziali operatori, tenendo conto delle diverse interazioni con il sedile.

3.1 Modellazione del sedile

Problematiche nella modellazione delle vibrazioni trasmesse dai sedili delle motrici ferroviarie. I sedili ammortizzati hanno lo scopo di ridurre le sollecitazioni trasmesse dal pavimento al manovratore. Numerosi sono gli studi e gli approfondimenti fatti su questo tema [4-6]. In molti lavori è stata realizzata una costruzione molto particolareggiata di modelli numerici di sedili. Nello studio di T.P. Gunston, J. Rebelleb e M.J Griffin [4], ad esempio, vengono costruiti in dettaglio i modelli numerici di due sedili.

Nello studio di T.P. Gunston, J. Rebelleb e M.J Griffin [4], ad esempio, vengono costruiti in dettaglio i modelli numerici di due sedili tenendo conto di effetti non lineari, attriti e smorzamento del cuscino. Modelli così accurati della seduta dovrebbero essere completati da un modello altrettanto accurato del sistema corpo dell'individuo che graverà su tale sedile. Il corpo umano può essere suddiviso in vari distretti (gambe, braccia, busto, testa) ed ogni distretto influisce sulla risposta del sedile alle sollecitazioni. Inoltre ogni distretto può essere schematizzato da un sistema di masse ed impedenze equivalenti molto complesso che non può non influire sul comportamento della seduta. Infine anche la posizione stessa che la persona assume è una variabile importante per la valutazione della trasmissione delle sollecitazioni all'individuo. Per valutare quindi con accuratezza la dose delle vibrazioni a cui viene sottoposta una persona, in determinate condizioni ambientali, non è conveniente costruire un modello dettagliato del sedile se non si considera l'influenza dovuta dall'interazione con il corpo umano. Tenuto conto della potenziale variabilità della forzante e dei sistemi, per i fini di prevenzione, è preferibile adottare modelli più semplici ma basati su un "approccio ergonomico semplificato" ossia in grado di tenere conto, anche se in prima approssimazione, dell'interazione con il corpo ad esempio introducendo una massa che grava sulla seduta. Nello sviluppo del modello si è pertanto deciso di seguire quest'ultima strada.

Modellazione del sistema sedile-macchinista. Nella costruzione del modello si è focalizzata l'attenzione su sedili per manovratori di motrici e ci si è basati sulle caratteristiche più comuni presenti in questo settore.

Il dispositivo di sospensione verticale del sedile solitamente è costituito da tre elementi che possono essere schematizzati come tre cilindri opportunamente sagomati, disposti con asse verticale, che traslano assialmente l'uno all'interno dell'altro. Il primo cilindro, caratterizzato dal diametro maggiore dei tre, è solidale alla base di appoggio del sedile sulla motrice ed al suo interno trovano sede una molla, un *damper* e il sistema di regolazione della lunghezza a precarico della molla. Il secondo cilindro, caratterizzato dal diametro intermedio tra i tre, appoggia sulla molla e sul *damper* ed allo stesso tempo è la base di appoggio del sistema di regolazione in altezza del sedile. Infine il terzo cilindro, che presenta il diametro più piccolo, appoggia sul sistema di regolazione in altezza ed è la base di appoggio della seduta.

Il sistema di sospensione studiato è costituito da una molla ed uno smorzatore coassiali e disposti verticalmente, il sedile quindi si comporta come un oscillatore semplice sollecitato alla base.

Il sistema di regolazione dell'altezza del sedile è costituito da due molle a gas, che però non vanno ad influenzare la dinamica del sistema avendo ipotizzato un valore della rigidezza molto elevato.

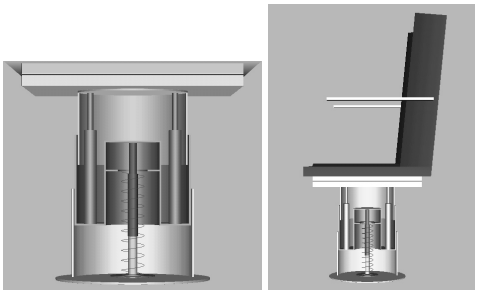


Figura 3: Modello del sedile costruito in ambiente ADAMS

È stato quindi costruito il modello in ambiente ADAMS in modo tale da risultare parametrico rispetto al carico applicato sulla sospensione. Questo significa che modificando la massa che grava sul sedile si ottiene automaticamente la regolazione della lunghezza a precarico della molla (Fig. 3). La regolazione avviene tramite un dischetto, sul quale poggia la molla stessa, che all'aumentare del carico applicato trasla verso l'alto, coassialmente ai cilindri, comprimendo così la sospensione e riducendone la lunghezza al precarico (Fig. 4).

Invece l'andamento dello smorzatore è stato introdotto definendo delle *spline* che descrivono la dipendenza della forza in funzione della velocità di questo componente (es. vedasi Fig. 5). Modificando la *spline* è possibile eseguire una serie di simulazioni per determinare l'ottimizzazione della legge per il *damper* al fine di ridurre il valore RMS delle accelerazioni.

Il modello consente infine di applicare la forzante in corrispondenza della base del primo cilindro in termini di accelerazioni, spostamenti o velocità. È così possibile sottoporre il sedile a sollecitazioni note ed effettuare un'analisi dinamica del sistema sedile-corpo al variare dell'interfaccia sedile-manovratore. In questo lavoro si tratta solo l'aspetto di un manovratore-manichino.

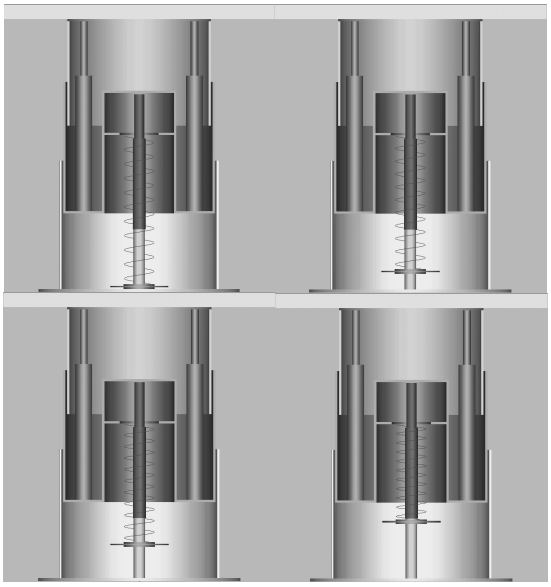


Figura 4: Esempi di regolazione della lunghezza a precarico della molla (da sinistra a destra rispettivamente per una massa di 60, 80, 100, 130 kg)

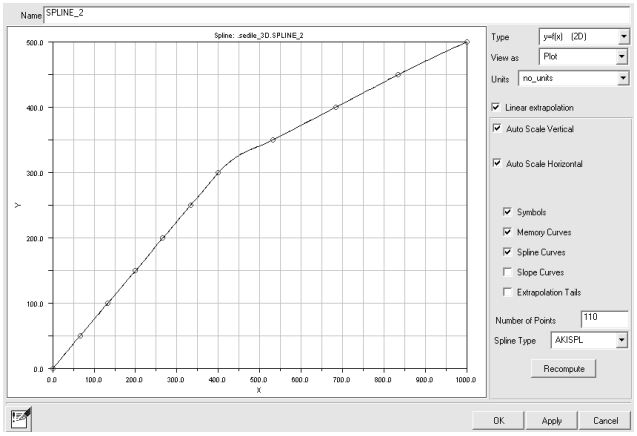


Figura 5: Esempio di spline che descrive la dipendenza della forza in funzione della velocità del damper

Le accelerazioni alle quali è sottoposto il macchinista-manichino vengono registrate in corrispondenza del centro di massa della seduta del sedile per poi essere successivamente rielaborate, nel post-processore dello stesso software, al fine di determinare il valore RMS.

Introduzione del filtro W_k nel modello. Il post-processore del software ADAMS consente di generare dei filtri per la ponderazione in frequenza dei segnali che vengono imposti/generati. Ciò è possibile introducendo opportuni parametri in una "funzione di trasferimento". Dotando quindi il modello del filtro W_k, come definito nella normativa, si ottiene un simulatore che fornisce in uscita il valore RMS dell'accelerazione ponderata in frequenza ed è quindi possibile stimare se il sedile, così com' è stato modellato, espone l'ipotetico macchinista a valori di vibrazioni tali da rispettare o meno le norme di tutela della salute quand'esso, macchinista reale, verrà sottoposto alle previste sollecitazioni alla base con un sedile reale, numericamente equipollente a quello del modello. Si sta ovviamente riducendo il sistema umano ad una sorta di manichino, vengono "tagliati" gli aspetti impulsivi che, qualora presenti, potrebbero giocare un ruolo non secondario nell'insorgere di patologie al rachide. Nel caso oggetto di studio, come si vedrà in seguito, le misurazioni della forzante sono caratterizzate da fattori di cresta inferiori a 9 e quindi il metodo basato sull'analisi del RMS utilizzando i filtri di ponderazione è ritenuto adeguato dallo standard ISO.

Per integrare il modello numerico del sedile con il filtro, sono stati determinati i coefficienti della funzione di trasferimento del filtro W_k partendo dai parametri presenti nell'allegato A della norma ISO 2631-1997.

Da qui la funzione di trasferimento H(s) del filtro W_k. Si tralascia per brevità e per ragioni di riservatezza di specificare le caratteristiche del filtro di cui si da solo l'andamento qualitativo (alla data di estensione del presente lavoro il prototipo di sedile realizzato a partire dal calcolo è in corso di valutazione da parte di Trenitalia).

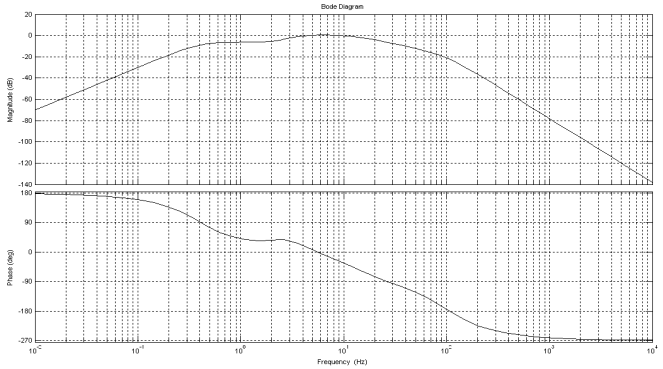


Figura 6: Modulo e fase di H(s)

3.2 Definizione della forzante

Misurazione sul campo per la caratterizzazione delle forzanti alla base del sedile. Per avere dei dati significativi le misurazioni sono state effettuate a bordi di un'elettromotrice, lungo la nuova tratta Udine – Tarvisio percorsa ad una velocità media di circa 90 Km/h. Con l'impiego di due accelerometri piezoelettrici, uno per ogni direzione di misura, due amplificatori di segnale ed un registratore, sono state effettuare le misurazioni delle accelerazioni lungo l'asse verticale e lungo gli assi trasversali. Le misure strumentali sono state realizzate disponendo la strumentazione come viene mostrato in Figura 7. I due accelerometri sono stati fissati in corrispondenza della base della parete che separa la postazione di guida con lo scomparto viaggiatori.

Le registrazioni effettuate sono state analizzate tramite il software BioBench.

Particolare attenzione è stata posta sulle accelerazioni verticali essendo queste fondamentali per lo studio del comportamento dinamico del sedile.

Le misurazioni sono state continue per una durata di circa venti minuti e in tutto questo lasso di tempo l'andamento delle sollecitazioni (Fig. 8) è rimasto pressoché omogeneo.

I picchi massimi delle accelerazioni rientrano in un intervallo che può essere valutato tra 2943 – 4905 mm/s^2 con un valore massimo del fattore di cresta del segnale di input che è risultato pari di 5.97 e dunque rende lecita la valutazione dell'esposizione mediante la stima dell'A(8).

Per quanto riguarda invece il contributo in frequenza dei segnali si è fatto ricorso allo spettro in potenza (Figg. 9 e 10). Questo ha consentito di indagare se nella motrice si generano delle sollecitazioni caratterizzate da frequenze che la normativa ritiene importanti o meno, e che quindi possono avere un peso importante ai fini del calcolo del coefficiente A(8).

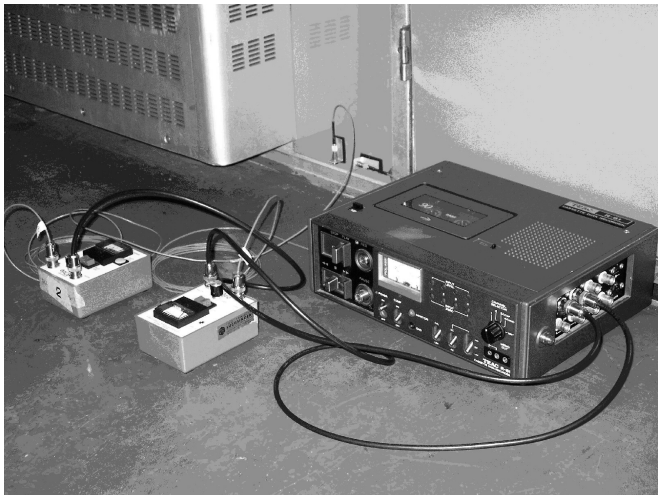


Figura 7: Disposizione della strumentazione in motrice

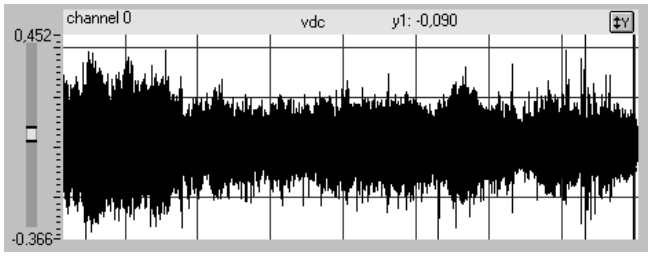


Figura 8: Accelerazioni verticali misurate sulla motrice

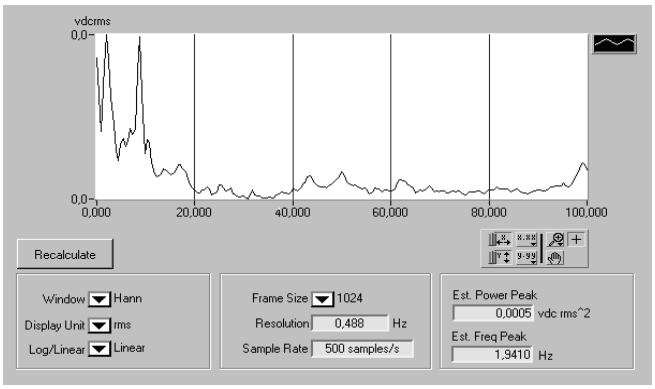


Figura 9: Spettro di potenza delle accelerazioni verticali, secondo la finestra di Hann, limitato ai 100 Hz

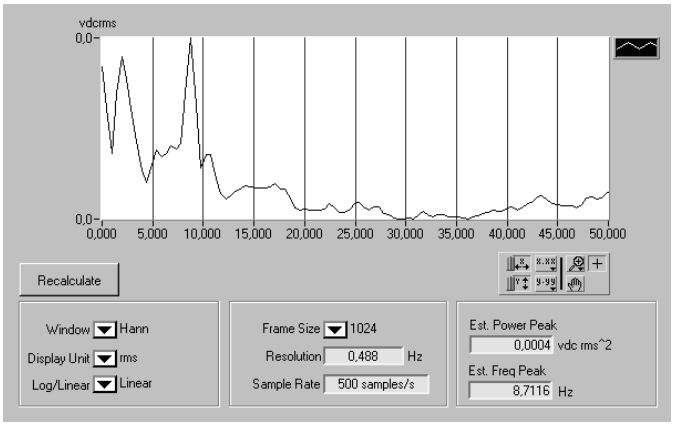


Figura 10: Spettro di potenza delle accelerazioni verticali, limitato ai 50 Hz

Gli spettri in potenza dei segnali evidenziano un contributo importante delle frequenze a 2 – 8.7 Hz.

Definizione della forzante equivalente. L'introduzione nel modello numerico di un segnale identico a quello registrato comporterebbe una mole di lavoro notevole e le simulazioni richiederebbero una quantità di calcoli molto elevata, quindi si è scelto di imporre una sollecitazione semplificata equivalente.

Nel modello alla base del sedile è stata imposta una legge sullo spostamento tale da generare delle accelerazioni che presentassero le caratteristiche del segnale registrato sul campo dal punto di vista del contributo in frequenza, dell'ampiezza e a parità di RMS.

Inoltre, data la ripetitività e la mancanza di transitori rilevanti nelle misurazioni effettuate sul campo, è stata imposta una legge del moto di tipo periodico. Il valore quadratico medio delle accelerazioni per un segnale periodico non varia al variare della durata della simulazione, quindi è stato possibile effettuare delle simulazioni di breve durata ma di buona precisione riducendo lo *step* di integrazione del simulatore.

La legge del moto imposta (Fig. 11) è del tipo:

$$s = \sum_{i=1}^{n} \exp[-(time - i)^2] \cdot \sin(\omega \cdot time) \tag{5}$$

dove:

- s è lo spostamento imposto
- i è una costante che trasla il segnale nel tempo
- ω è la pulsazione del segnale

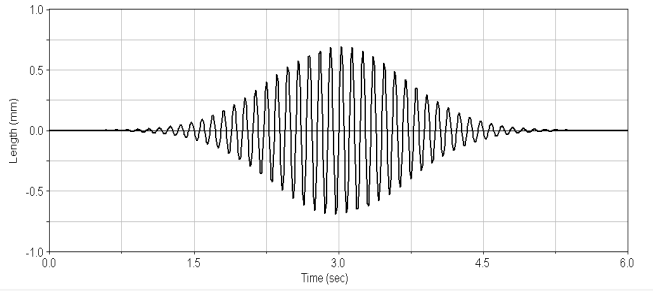


Figura 11: Spostamento imposto alla base di appoggio del sedile nel modello numerico

Si è scelto questo tipo di segnale in quanto è controllabile in frequenza e quindi permette di imporre le frequenze delle armoniche predominanti del segnale reale, e consente di generare una sollecitazione di carattere impulsivo molto prossima a quella reale sovrapponendo più funzioni nel tempo. La sollecitazione imposta nel modello numerico (Figg. 12, 13) risulta semplificata in quanto sono state eliminate le frequenze non predominanti del segnale registrato.

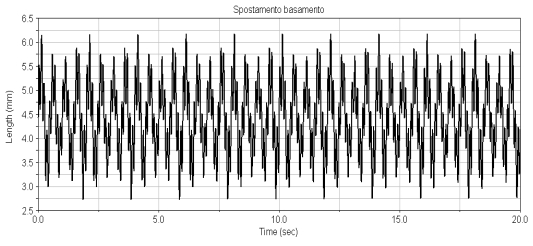


Figura 12: Spostamento imposto alla base di appoggio del sedile

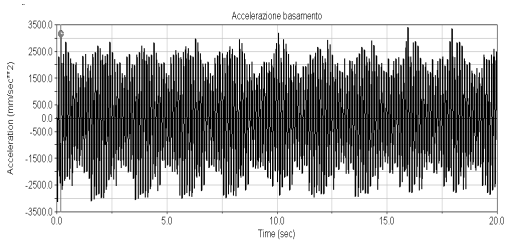


Figura 13: Accelerazione imposta alla base di appoggio del sedile

4. SIMULAZIONI E RISULTATI OTTENUTI

Le simulazioni sono state realizzate variando le impedenze meccaniche (rigidezze, smorzamenti).

Variando per il sedile quote a riposo, sotto carico (occupante), impedenze meccaniche, forzante, ecc. si perviene ad una soluzione "ottimale".

Non sono ovviamente riportati, per le questioni connesse a quanto in precedenza esposto, i valori restituiti dall'indagine numerica. Si segnala però che i valori RMS ed i valori del coefficiente A(8) sono stati calcolati per le varie condizioni di carico supponendo periodi di esposizione effettiva alle vibrazioni di 5, 6, 7 e 8 ore.

A titolo di esempio nelle figure 14 e 15 vengono riportati gli andamenti delle accelerazioni non ponderate e ponderate in frequenza per un macchinista avente una massa di 60 kg.

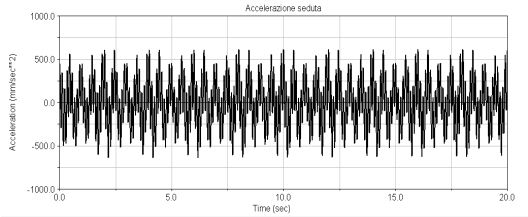


Figura 14: Andamento dell'accelerazione, non ponderata in frequenza, registrata in corrispondenza della seduta per una massa applicata di 60 kg

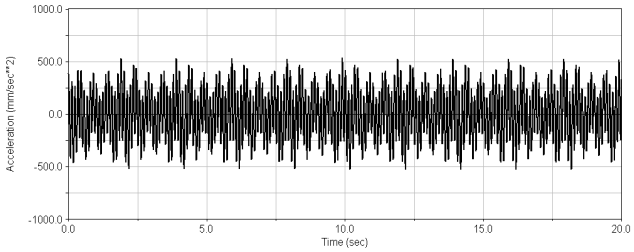


Figura 15: Andamento dell'accelerazione, ponderata in frequenza, registrata in corrispondenza della seduta per una massa applicata di 60 kg

I valori RMS, ponderati e non, dell'accelerazione per varie condizioni di carico sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1: Valori RMS dell'accelerazione per una massa applicata di 60, 80, 100, 130 kg

Massa applicata (kg)	RMS (mm/s^2)	RMS$_w$ (mm/s^2)
60	292.43	251.36
80	239.83	195.30
100	191.03	155.74
130	140.25	117.29

Si osserva che i valori ottenuti sono significativamente inferiori ai limiti imposti dalla normativa sulla dose di vibrazioni.

I valori del coefficiente A(8) per un'esposizione effettiva e continuativa pari a 5, 6, 7 e 8 ore sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2: Valori del coefficiente A(8) per diverse durate di esposizione effettiva al variare della massa applicata.

A$_w$ (mm/s^2)	Massa applicata (kg)			
Tempo di effettiva esposizione (h)	60	80	100	130
5	198.71	154.39	123.12	92.72
6	217.68	169.13	134.87	101.57
7	235.12	182.68	145.68	109.71
8	251.36	195.30	155.74	117.29

Anche in questo caso i valori ottenuti sono inferiori ai limiti imposti dalla normativa.

Le simulazioni hanno consentito inoltre di osservare la presenza di un considerevole miglioramento nel comportamento del sistema di sospensione all'aumentare del carico applicato, questo perché la frequenza di risonanza del sedile si riduce all'aumentare della massa applicata in corrispondenza della seduta (Fig. 16), allontanandosi al di sotto delle frequenze predominanti della sollecitazione in ingresso.

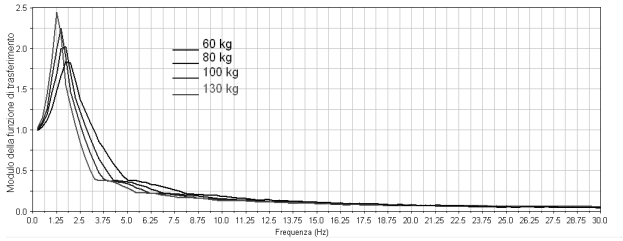


Figura 16: Modulo della funzione di trasferimento del sistema sedile al variare della massa.

5. CONCLUSIONI

La problematica della valutazione del rischio da vibrazioni in ambiente lavorativo, in particolare per quanto riguarda le vibrazioni trasmesse al sistema corpo intero, è un settore che è e che deve essere ancora oggetto di studio. La complessità del corpo umano e la varietà delle sollecitazioni alle quali può essere sottoposto un individuo non permettono di stabilire con semplicità il nesso causale tra la sollecitazione ed il danno biologico, ed inoltre le metodologie che vengono attualmente utilizzate si fondano su ipotesi che vengono ritenute soltanto plausibili.

Oltre al problema della diversa sensibilità del corpo umano alle vibrazioni è necessario tenere conto dell'influenza dell'interazione tra sistema forzante e corpo sollecitato.

Lo studio presentato, applicato al caso della quantificazione delle vibrazioni indotte dal sedile di guida di una motrice ferroviaria, è stato sviluppato adottando una modellazione basata su un approccio semplificato, con l'intento però di seguire seppure in prima approssimazione un approccio

ergonomico. La creazione di un modello numerico, per la simulazione del comportamento dinamico del sedile, è stata sviluppata in modo da tenere conto del diverso carico applicato (peso del macchinista). Ciò ha permesso non solo di verificare i livelli di esposizione a vibrazione di diversi operatori ma anche di simulare le diverse risposte al variare delle impedenze meccaniche del sistema di sospensione.

La metodologia proposta, oltre ad essere utilizzabile per il controllo del rispetto dei livelli di esposizione a vibrazioni consentiti dalle recenti norme di sicurezza e prevenzione di recepimento comunitario, risulta anche utile sotto il profilo della progettazione a valenza "ergonomia" dei sedili di guida, in quanto permette di ottimizzare la taratura delle impedenze meccaniche in funzione del singolo tracciato e motrice sui quali il sedile potrebbe essere utilizzato e adattandolo al tipo di conduttore, ossia alla propria massa e alla propria, eufemisticamente definita, "matrice di impedenze".

6. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Matteo Lorigiola e Alberto Perin che il contributo apportato durante la preparazione delle tesi di laurea.

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. ISO 2631-1, 1997. Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration.
2. Direttiva 2002/44/CE del 25 giugno 2002 del Parlamento Europeo e del Consiglio sulle prescrizioni minime di sicurezza di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (vibrazioni).
3. Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 187. Attuazione della direttiva 2002/44/CE sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relativa all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti da vibrazioni meccaniche.
4. T.P. Gunston, J. Rebelle, M.J. Griffin., A comparison of two methods of simulating seat suspension dynamic performance. Journal of Sound and Vibration 278 (2004) 117-134.
5. C.H. Lewis, M.J. Griffin, Evaluating the vibration isolation of soft seat cushions using an active anthropodynamic dummy, Journal of Sound and Vibration 253 (2002) 295-311.
6. M. Bouazara, M.J. Richard, S. Rakheja, Safety and comfort analysis of a 3-D vehicle model with optimal non-linear active seat suspension, Journal of Terramechanics 43 (2006) 97-118.
7. P. De Santis, R. Nitti, G. Rosci, Il rischio da vibrazioni al corpo intero: dubbi interpretativi ed aspetti irrisolti alla luce della direttiva 2002/44/CE, – 3° Seminario aggiornamento dei professionisti CONTARP la prevenzione che cambia. I ruoli, le strategie e le sinergie degli "attori" coinvolti. Napoli, marzo 2003. pp 297-305
8. P. Pascolo, Dynamics of the human cervical spine and neuromuscolar control, Journal of whiplash & related disorders 1-4 (2005), 25-41.
9. Kitazaki, S. and Griffin, M.J., Resonance behavior of the seated human body and effects of posture, Journal of biomechanics, Vol. 31, 143-149, 1998
10. Murielle M. Verver, Anneloes Marieke Dalenoort, Herman Mooi, Muscle Modelling for Prediction of Human Resonance Behaviour in Vertical Vibrations by Numerical Simulations, SAE Technical Papers 2005-01-2711
11. Guo LX, Teo EC, Lee KK, Zhang QH, Vibration characteristics of the human spine under axial cyclic loads: effect of frequency and damping, Spine. 2005 Mar 15;30(6):631-7.
12. L.M. Virtanen, J. Karppinen, S.O. Taimela, J. Ott, S. Barral, K. Kaikkonen, O. Heikkila, P. Mutanen, N. Noponen, M. Mannikko, O. Tervonen, A. Natri, L. Leena, Occupational and Genetic Risk Factors Associated With Intervertebral Disc Disease**,** Spine. 32(10):1129-1134, May 1, 2007

8. NOMENCLATURA

A_w = valore quadratico medio dell'accelerazione ponderata in frequenza
a_w= valore quadratico medio dell'accelerazione ponderata in frequenza
A_{w1}= valore quadratico medio dell'accelerazione ponderata in frequenza calcolato all'istante T_1
A_{w2} = valore quadratico medio dell'accelerazione ponderata in frequenza calcolato all'istante T_2
A(8) = accelerazione equivalente ponderata in frequenza riferita ad otto ore lavorative
CF = fattore di cresta
H(s)= funzione di trasferimento
i = costante che trasla il segnale nel tempo
s = spostamento imposto
T = durata dell'esposizione
T_1 = tempo di inizio dell'esposizione
T_2 = tempo di fine dell'esposizione
T_e = tempo di esposizione
W_k = filtro
ω= pulsazione del segnale

Apici e pedici

w
e = esposizione
k
1 = istante iniziale
2 = istante finale

Acronimi

HAV = Harnd Arm Vibration
MTVV = Maximum Transient Vibration Value
RMS = Root Mean Square
VDV = fourth power Vibration Dose Value
WBV = Whole Body Vibration

SESSIONE

IMPATTO AMBIENTALE

MISURE DI RADON OUTDOOR:RISULTATI E CORRELAZIONI CON LA STABILITÀ ATMOSFERICA E LA QUALITÀ DELL'ARIA IN PIANURA PADANA

Erbetta Laura[2], Bianchi Donatella [2], Dellacasa Giuseppe[1], Garbero Valentina[1]

[1]Dipartimento di Scienze e Tecnologie Avanzate, Università del Piemonte Orientale, Via Bellini 25/G, 15100 Alessandria, Italy

[2]ARPA Piemonte – Dipartimento di Alessandria, Spalto Marengo 37, 15100 Alessandria, l.erbetta@arpa.piemonte.it

SOMMARIO

Le concentrazioni degli inquinanti atmosferici e il loro accumulo nei bassi strati dipendono fortemente dalle proprietà di diluizione dello strato limite planetario. E' possibile ricavare utili informazioni sul potenziale di diluizione dello strato di rimescolamento dal monitoraggio al suolo del radon, il quale viene rilasciato dal terreno e disperso in aria, come gli inquinanti atmosferici, mediante fenomeni di diffusione turbolenta generata da forzanti di tipo meccanico e termico. Al fine di una migliore comprensione delle dinamiche dell'inquinamento atmosferico nella città di Alessandria, è stato messo a punto un sistema per la rivelazione in continuo delle concentrazioni orarie di radon outdoor con il duplice scopo di caratterizzare l'andamento del radon in atmosfera durante il giorno e durante le diverse stagioni e nel contempo ricercare correlazioni significative con i principali inquinanti dell'aria. Il lavoro riassume i risultati ottenuti sull'arco temporale di un anno. Dai dati raccolti emerge come il radon presenti un profilo tipico giornaliero ed uno stagionale e gli andamenti siano strettamente influenzati da parametri meteorologici quali radiazione solare, vento e temperatura. Gli andamenti orari mostrano buone correlazioni con le concentrazioni di gas inquinanti quali benzene e NO_2 e di particolato fine PM10. Lo studio conferma che il radon è un buon indicatore secondario delle proprietà di diluizione dell'atmosfera e che la sua misura consente una stima indiretta dello strato di rimescolamento permettendo così di estrapolare il peso delle condizioni atmosferiche nei fenomeni acuti di inquinamento in pianura padana.

1 INTRODUZIONE

Il radon-222 è un gas nobile radioattivo appartenente alla catena di decadimento dell'Uranio-238, ed è un prodotto del decadimento del Radio-226. Il radon è rilasciato dal suolo all'atmosfera dove viene disperso principalmente dalla diffusione turbolenta, derivante dalle forze meccaniche (forze d'attrito superficiali) e da quella termica (galleggiamento) [1,2,3]. Poiché il radon è caratterizzato da assenza di reattività chimica in atmosfera, da un tasso pressoché costante di emissione dal suolo (nello spazio e nel tempo) e da un'emivita piuttosto lunga (3.82 giorni) rispetto alle costanti di tempo caratteristiche degli eventi atmosferici, può essere vantaggiosamente impiegato come tracciante nello studio delle proprietà di diluizione dello strato limite planetario. Diversi autori hanno perciò cercato di impiegare il radon nello studio delle dinamiche atmosferiche degli inquinanti convenzionali [4] [5]. Gli inquinanti atmosferici presi in considerazione in questo lavoro sono: il particolato con diametro inferiore a 10 μm (PM_{10}), il benzene e il biossido di azoto (NO_2). Il PM_{10} è un inquinante particolarmente critico nella zona della città di Alessandria e, in generale, in tutta la Pianura Padana, perché spesso la sua concentrazione supera i valori limite stabiliti dal D.M. 2/4/2002 n.60 per la qualità dell'aria ambiente; ciò accade in modo più frequente nella stagione invernale dimostrando che i valori di concentrazione di particolato sono fortemente influenzati dagli effetti stagionali. Studi effettuati da diversi autori mostrano che accanto al carico emissivo, l'orografia della zona, le sue condizioni meteorologiche tipiche e anche le condizioni di dispersione atmosferiche giocano un importante ruolo nel descrivere gli eventi di inquinamento primario. Per tale ragione il radon è stato proposto come tracciante per fenomeni d'inquinamento acuto.

2 MATERIALI E METODI

Le misure di radon outdoor, con risoluzione oraria, sono state ottenute mediante il funzionamento in continuo di un campionatore PMT-TEL posizionato a circa 4 metri dal suolo. La sonda di rilevamento è costituita da una camera di forma cilindrica di volume 15.5 litri. La parete interna della sonda funge da anodo a basso potenziale, mentre un cilindro coassiale interno di alluminio funge da catodo con un potenziale elettrico di 1200 V. Il catodo è ricoperto da un materiale scintillatore, sensibile alla radiazione alfa, che è montato su un tubo che termina con un fotomoltiplicatore. Una pompa interna guida l'aria da misurare e i prodotti del decadimento del radon sono attratti e raccolti dal catodo; le particelle alfa emesse del radon e dalla sua progenie depositano l'energia nello scintillatore, il quale produce impulsi luminosi che vengono amplificati, convertiti in impulsi elettrici e infine conteggiati da un dispositivo esterno (MIAM, MR-1). Vi è una relazione diretta tra la concentrazione di gas radon nella sonda PML-TEL e il numero di impulsi luminosi contati. Questo sistema è notevolmente sensibile, grazie alla raccolta della progenie del radon sul catodo, rispetto ai rivelatori basati semplicemente sulla diffusione: infatti è in grado di rilevare concentrazioni di radon molto basse (il minimo di attività rilevabile è 0.93 Bq/m^3) ed è quindi particolarmente adatto per registrare le tipiche concentrazioni di radon in ambiente esterno.

I dati riguardanti gli inquinanti sono orari e campionati in continuo in una stazione di monitoraggio nei pressi di un importante incrocio urbano e ad una distanza di circa 1500 m dalla stazione di monitoraggio del radon (figura 1). Le concentrazioni orarie per le polveri sono state misurate grazie all'utilizzo di una microbilancia oscillante, TEOM, mentre le

concentrazioni di biossido di azoto sono state misurate per mezzo dello strumento API 200 (chemiluminescenza) e il benzene tramite il Syntec GC855 (gas-cromatografia). Le teste di prelievo degli inquinanti sono situate a circa 3 metri dal suolo, in modo che i dati non siano influenzati dalla turbolenza generata dal transito degli autoveicoli.



Figura 1: Posizione del rivelatore di radon e della centralina degli inquinanti

2 RISULTATI

2.1 Il radon

Le concentrazioni di radon misurate mostrano il tipico andamento giornaliero e stagionale già evidenziato in lavori effettuati da altri autori [4,5].

L'andamento giornaliero generalmente è caratterizzato da un valore minimo nel tardo pomeriggio e da una massimo raggiunto nelle prime ore del mattino.

L'accumulo notturno di radon è dovuto al basso strato di rimescolamento causato dall'inversione termica al suolo, che si verifica prevalentemente quando il terreno si raffredda durante la notte e cede così calore all'atmosfera per irraggiamento provocando un aumento delle temperature con la quota. Tali condizioni inibiscono fortemente la dispersione del radon e degli inquinanti emessi al suolo. Nelle città, edifici e strade si raffreddano più lentamente rispetto alle zone rurali e ne consegue un diverso profilo verticale della temperatura: nei primi 100 metri è presente un profilo instabile di solito sormontato da uno strato più stabile che impedisce lo scambio di aria a i due strati. Perciò, in ambiente urbano risulta difficile ottenere una stima dello strato di rimescolamento con gli strumenti e i modelli tradizionali e può essere particolarmente utile l'applicazione di metodi indiretti come quello qui presentato.

Al mattino, quando il sole sorge riscaldando la terra, l'inversione termica viene distrutta e il rimescolamento di radon avviene in strati con altezze sempre maggiori causando una diminuzione della sua concentrazione. La concentrazione minima è normalmente misurata durante il pomeriggio, quando lo strato di rimescolamento raggiunge la sua massima altezza.

Questa tendenza viene osservata nei giorni con cielo sereno e basso tasso di ventilazione, sia durante il periodo notturno, sia durante il giorno, come durante la giornata del 9 ottobre 2008 (in fig. 2); al contrario, non si osserva in giornate ventose e nuvolose, come il 28 ottobre 2008, quando sia la tendenza adiabatica diurna, sia la stabilità notturna sono inibite.

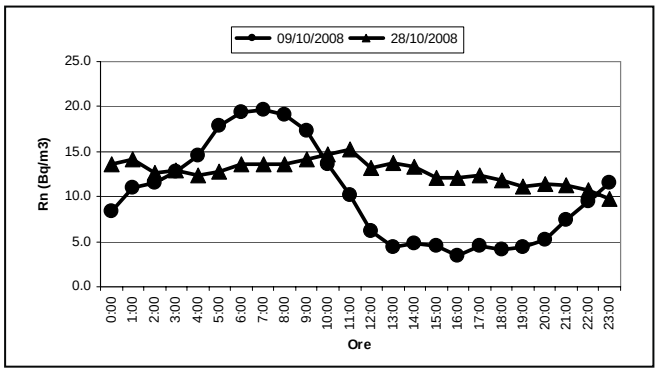


Figura 2: Concentrazioni orarie di Rn il 9 e il 28 ottobre 2008

Nei giorni in cui il cielo è sereno, la variazione tra il massimo e il minimo della concentrazione di radon dello stesso giorno è un buon indicatore dell'altezza massima dello strato di rimescolamento diurno. Nelle notti in cui il cielo è sereno, la variazione tra il minimo del pomeriggio e il massimo del giorno dopo è invece un buon indicatore dello schiacciamento notturno dello strato di rimescolamento [5].

Osservando le concentrazioni di radon su scala di tempo mensile, è possibile delineare comportamenti stagionali, dovuti alla diversa quantità di radiazione solare che durante il susseguirsi delle stagioni raggiunge la superficie terrestre [6]. Dunque, è possibile distinguere il periodo invernale (ottobre-febbraio) caratterizzato da concentrazioni alte di radon, dal periodo estivo (maggio-agosto), in cui le concentrazioni sono più esigue; i mesi rimanenti (marzo, aprile, settembre) possono essere classificati come mesi intermedi. In figura 3 sono riportati gli andamenti stagionali delle giornate medie calcolate per i mesi invernali, per quelli estivi e quelli intermedi.

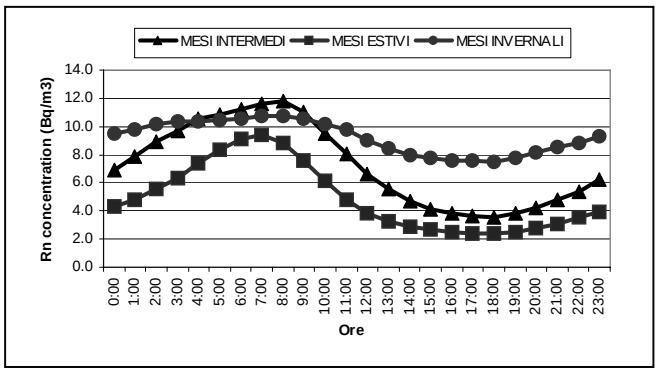


Figura 3: Giorni medi di radon

Questo andamento stagionale è tipico della pianura padana, dove molto spesso, nel corso dei mesi invernali, hanno luogo lunghi periodi di stabilità atmosferica, persistenti anche durante le ore diurne, che causano elevati valori di radioattività naturale anche durante il giorno. In inverno, la miscelazione diurna, se presente, non solo è debole, ma anche

di breve periodo di tempo dal momento che in genere rimane per poche ore, dalla tarda mattinata alle prime ore del pomeriggio. In figura 4 sono riportate le medie delle concentrazioni mensili di radon e la media delle concentrazioni minime e massime mensili, in cui si può notare la continua crescita dei minimi, passando dal periodo estivo a quello invernale.

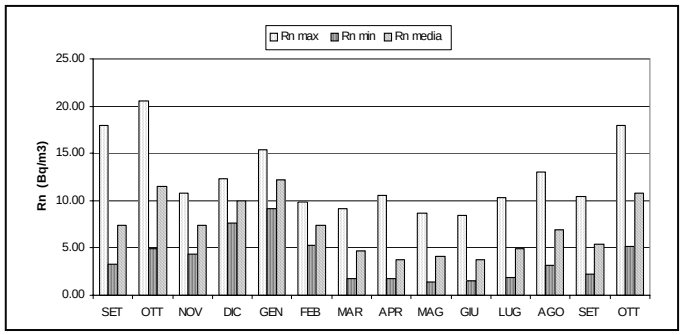


Figura 4: Medie mensili delle concentrazioni di radon da settembre 2008 a ottobre 2009

Le condizioni meteo sono sicuramente un fattore determinante per le concentrazioni di radon outdoor; in particolare, si son ottenute buone correlazioni inverse: tra le medie mensili dei minimi diurni di radon e la radiazione totale al suolo (corr. di Pearson = -0.78); tra le medie mensili dei minimi diurni di radon e temperatura media (corr. di Pearson = -0.79), come mostrato in fig.5; tra le concentrazioni medie di radon e la velocità media del vento (corr. di Pearson = -0.81) come presentato in fig.6.

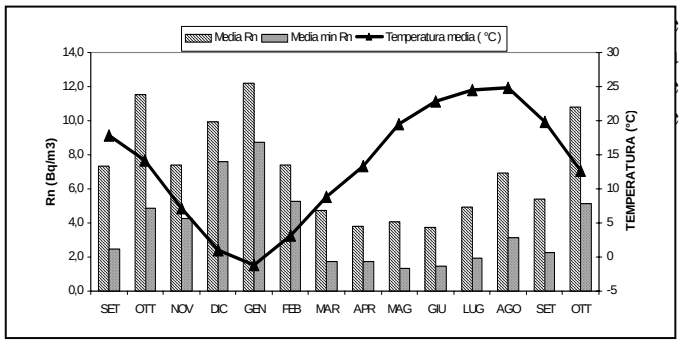


Figura 5: Medie mensili di radon, medie dei minimi di radon e media della temperatura da settembre 2008 a ottobre 2009.

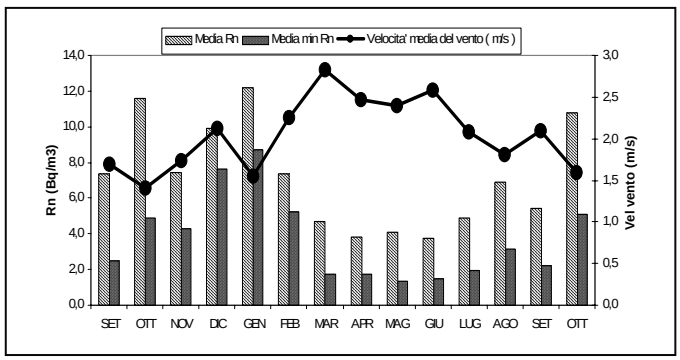


Figura 6: Medie mensili di radon, medie dei minimi di radon e media della velocità del vento da settembre 2008 a ottobre 2009.

2.2 Gli inquinanti urbani

Gli inquinanti da noi presi in considerazione sono: PM_{10}, benzene e biossido di azoto, dovuti principalmente al traffico veicolare. Tipicamente presentano due massimi di concentrazione, intorno alle ore 8-9 e intorno alle 19-20, in relazione al flusso di traffico; l'inquinamento dell'aria in città aumenta al mattino, a causa del traffico, diminuisce nel primo pomeriggio quando lo strato di rimescolamento raggiunge l'altezza massima e aumenta di nuovo nelle ore serali, quando il potere di diluizione dello strato di rimescolamento cessa [7].

In figura 7 è riportato il giorno medio delle concentrazioni di NO_2 , in cui è possibile riconoscere i due tipici picchi.

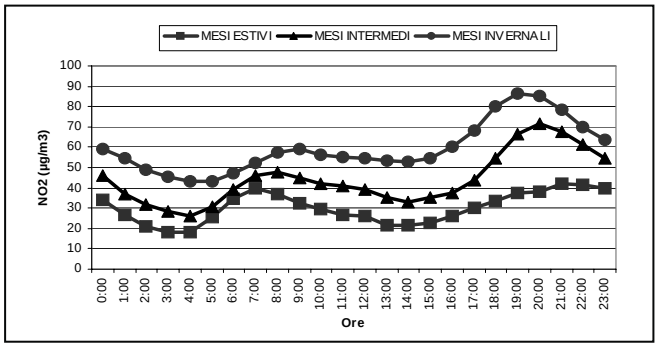


Figura 7: Giorno medio delle concentrazioni di NO_2 del periodo estivo, di quello invernale ed intermedio.

Anche per le concentrazioni d'inquinanti, come per il radon, è possibile riscontrare un comportamento stagionale: il periodo invernale è caratterizzato da concentrazioni d'inquinanti maggiori rispetto alla stagione estiva; ciò è dovuto al fatto che, nel periodo invernale, la diminuzione delle concentrazioni durante le ore centrali della giornata è più debole, per la scarsa diluizione, causando un picco serale delle concentrazioni d'inquinanti più accentuato [4] [7].

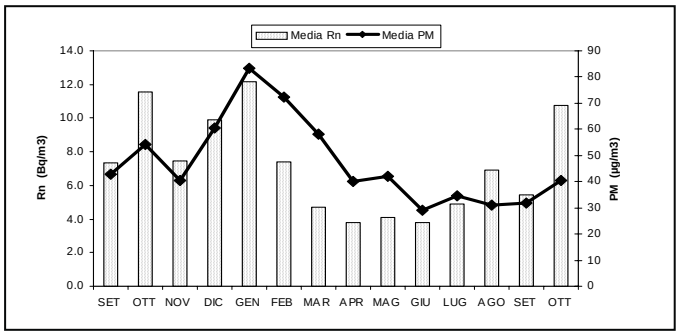


Figura 8: Medie mensili dei radon e particolato da settembre 2008 a ottobre 2009

Il confronto tra le concentrazioni medie mensili di radon e di PM10, riportati in figura 8, mostra una stretta somiglianza (correlazione di Pearson = 0.87).

Anche le concentrazioni orarie degli inquinanti mostrano, un andamento molto simile: un esempio è riportato nella figura 11, che mette a confronto le concentrazioni orarie di radon e di benzene nella seconda metà del mese di gennaio 2009 (correlazione di Pearson = 0.60): nelle giornate di pioggia e forte ventilazione (27 gennaio), il radon e le concentrazioni di benzene sono molto basse, mentre durante le

giornate con cielo limpido (dal 29 al 31 gennaio) è possibile riconoscere le tipica tendenza diurna con concentrazioni di picco di durata limitata; al contrario, in giornate nuvolose e nebbiose (dal 17 al 20 gennaio) persistono concentrazioni elevate di radon e di benzene durante tutto il giorno.

Una correlazione simile si trova, considerando separatamente, per ogni giorno, la media diurna (ore 7-19) e la media notturna (ore 19-7), come mostrato in figure 9 e 10 (rispettivamente correlazione di Pearson = 0.73 e correlazione di Pearson = 0.87).

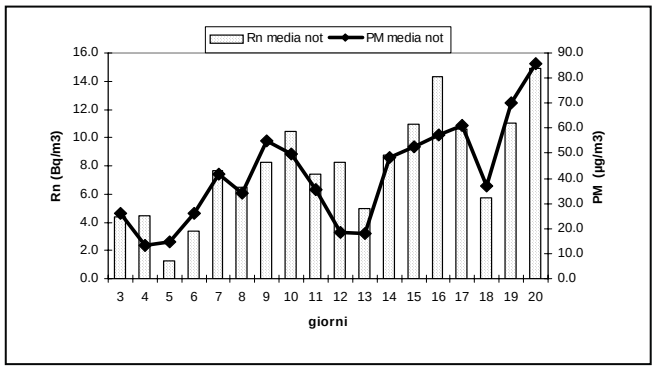


Figura 9: Media delle concentrazioni diurne nel mese di novembre 2008

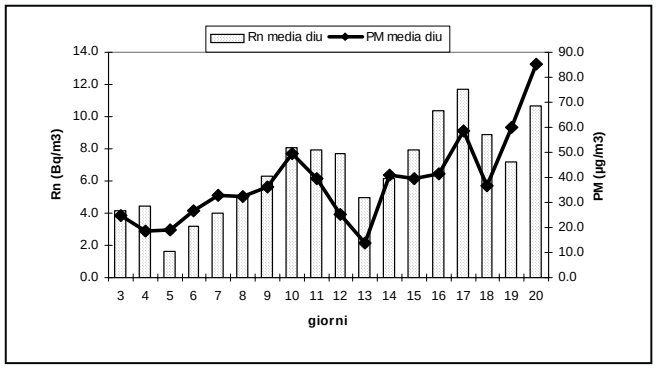


Figura 10: Media delle concentrazioni notturne nel mese di novembre 2008

2.3 Stima dell'altezza dello strato di rimescolamento

Dai dati sperimentali di concentrazione di radon è possibile, impiegando opportuni modelli, fare una stima dell'altezza dello strato di rimescolamento nelle varie condizioni meteorologiche. Uno dei modelli più comunemente utilizzati a questo scopo è quello di Fontan [5], il quale assume le seguenti ipotesi: il flusso di radon dal suolo viene emesso in modo costante, la concentrazione di radon varia solamente in funzione della stabilità verticale e non viene alterata da movimenti orizzontali, lo strato residuale del radon viene conservato. Tenendo presente queste ipotesi, è possibile stimare l'altezza oraria nel periodo notturno h_{i+1} dello strato di rimescolamento al tempo $i+\Delta t$, attraverso la seguente equazione [5]:

$$h_{i+1} = \frac{\phi \cdot \left(1 - e^{-\lambda \Delta t}\right)}{\lambda \cdot \left(C_{i+1} - C_i \cdot e^{-\lambda \Delta t}\right)} \qquad (1)$$

dove h_i è l'altezza dello strato di rimescolamento al tempo i, C_i è la concentrazione di radon al tempo i (Bq/m^3) e C_{i+1} è la concentrazione di radon al tempo $i+\Delta t$, Δt è l'intervallo temporale (ore), λ è la costante di decadimento del radon (h^{-1}), Φ è il flusso di radon dal suolo, un parametro che viene assunto costante e che, nel nostro caso, viene posto pari a 72 $Bq/(m^2 \cdot h)$. Questa formula è applicabile quando le concentrazioni di radon crescono e quindi durante le ore notturne.

Durante le ore diurne di giornate con cielo sereno, quando le concentrazioni di radon diminuiscono, viene invece usata la seguente formula:

$$h_{i+1} = \frac{\frac{\phi \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t})}{\lambda} + h_i \cdot c_i \cdot e^{-\lambda \Delta t} - h_i \cdot c_{r*}}{c_{i+1} - c_r^*} \qquad (2)$$

dove i simboli sono gli stessi della formula precedente e dove C_r^* indica la concentrazione presente nello strato residuale al tempo i+1, tenendo conto del decadimento radioattivo. Generalmente la concentrazione minima di radon del giorno precedente è una soddisfacente approssimazione della concentrazione nello strato residuale [5].

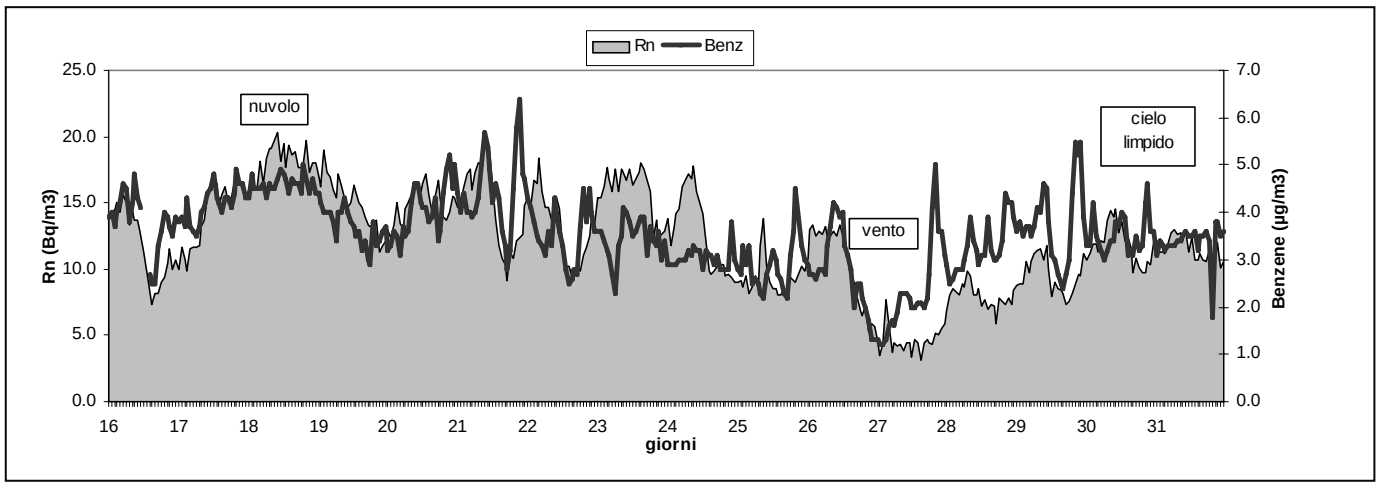


Figura 11: Concentrazioni orarie di radon e di benzene - gennaio 09

Le Figure 12, 13 e 14 mostrano l'altezza di rimescolamento notturna e diurna calcolata in questo modo considerando le giornate medie del mese di febbraio 2009, agosto 2009 e ottobre 2009.

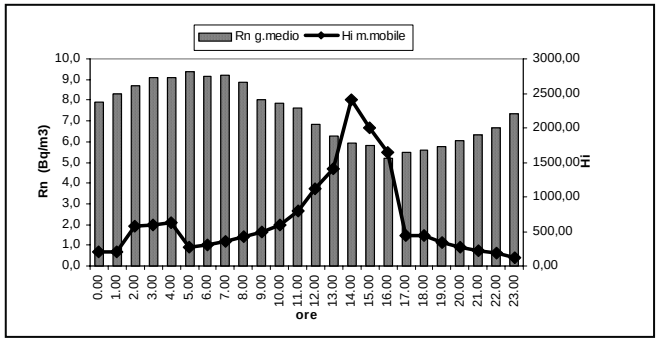


Figura 12: Giorno medio delle concentrazioni di radon e stima dell'altezza di rimescolamento nel mese di febbraio 2009

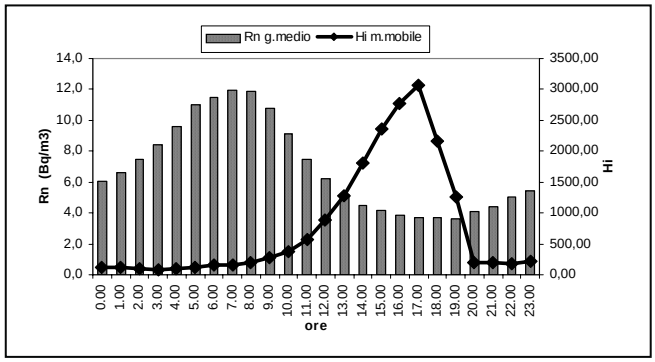


Figura 13: Giorno medio delle concentrazioni di radon e stima dell'altezza di rimescolamento nel mese di agosto 2009

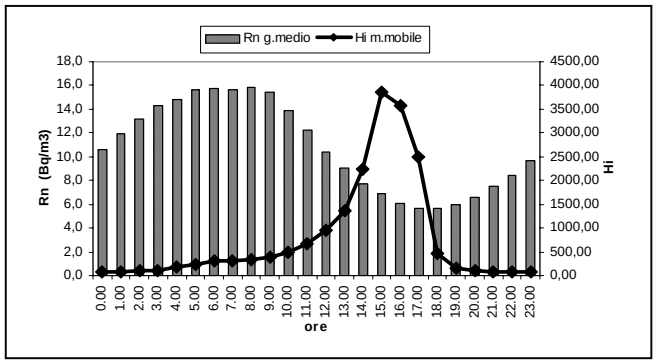


Figura 14: Giorno medio delle concentrazioni di radon e stima dell'altezza di rimescolamento nel mese di ottobre 2009

Gli andamenti dello strato limite mostrano analogie con le stime effettuate da altri autori e con altri modelli [8]. Se si considerano le medie stagionali dei valori minimi diurni di radon da noi registrati nell'arco di un anno e si calcola il rapporto tra le medie dei minimi invernali e quelle estive si ottiene un fattore 3. Un analogo fattore 3 si ottiene dal rapporto inverno/estate dell'altezza dello strato rimescolato calcolata dal pre-processore meteorologico di ARPA Piemonte per la modellistica della qualità dell'aria a partire dai profili di temperatura e dai campi di vento. Ciò conferma come le stime dello strato rimescolato a partire dalle concentrazioni di Radon siano più che soddisfacenti e di grande utilità considerato che ci si basa su di un sistema di misura semplice e di costi contenuti a confronto con altre metodiche. Risultati ancora migliori si potrebbero ottenere effettuando una stima diretta di alcuni dati di input del modello, come ad esempio il flusso di radon dal suolo riferito all'area alessandrina. A questo scopo è in programma la messa a punto di un sistema di misura puntuale di tale parametro che permetterà un confronto più preciso con simulazioni ottenute da modelli fluidodinamici.

3 CONCLUSIONI

I risultati delle misurazioni delle concentrazioni orarie di radon all'esterno, intraprese nel corso di un anno, hanno confermato come tale gas possa essere considerato un buon tracciante secondario per lo studio delle proprietà di diluizione dello strato limite planetario. Considerando le concentrazioni medie, è stata riscontrata una stretta correlazione tra tutti gli inquinanti urbani e le concentrazioni di radon. Tutti i dati hanno confermato il ruolo predominante svolto dalle condizioni atmosferiche nel determinare, soprattutto in inverno, il verificarsi di fenomeni acuti di inquinamento in pianura padana.

4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. W.W. Nazaroff A.V. Nero Jr. Radon and its decay products in indoor air. John Wiley and Sons 1988
2. L.Tommasino, Radon - Encyclopedia of Analytical Science,1998, pp. 4359-4368
3. J.H. Seinfeld S.N. Pandis Atmospheric chemistry and physics John Wiley and Sons 1998
4. C. Perrino, A. Pietrodangelo, A. Febo. C.N.R., Istituto d'inquinamento atmosferico, Roma. An atmospheric stability index based on radon progeny measurements for the evaluation of primary urban pollution. Atmospheric environment 35, 2001, p. 5235-5244.
5. L. Sesana, E. Caprioli, G.M. Marcazzan. Istituto di Fisica Generale Applicata, Università di Milano, Italia. Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion proprieties of atmosphere. Journal of environmental radioactivity 65, 2003, p. 147-160.
6. R. Vecchi, G. Marcazzan, G. Valli, M. Ceriani, C. Antoniazzi. Istituto di Fisica Nucleare, Università di Milano, Italia. The role of atmospheric dispersion in the seasonal variation of PM1 and PM 2.5 concentration and composition in the urban area of Milan (Italy). Atmospheric environment 38, 2004, p. 4437-446.
7. R. Vecchi, G.Marcazzan, G. Valli. Istituto di fisica generale applicata, Università di Milano. A study on night time-daytime PM10 concentration and elemental composition in relation to atmospheric dispersion in the urban area of Milan Italy). Atmospheric environment 41, 2007.
8. S. Casadei, M. Giugliano, G. Lonati, F. Pacifico, G. Valli, R. Vecchi. Valutazione dell'altezza dello strato di rimescolamento nell'area urbano di Milano nel biennio 2003-2004. Ingegneria Ambientale, vol XXXV, n.4, aprile 2006

EFFETTO SULLE EMISSIONI INQUINANTI DELL'ADOZIONE DEL PIANO REGOLATORE PORTUALE DELLA CITTÀ DI MESSINA

C. Marino, A. Nucara, M. Pietrafesa, A. Pudano, M. Tripodi

DIMET, Università Mediterranea di Reggio Calabria, via Graziella – Feo di Vito, 89122 Reggio Calabria

SOMMARIO

Il presente lavoro riporta i risultati di una analisi finalizzata alla valutazione dell'efficacia di un intervento mirato alla riduzione dei carichi inquinanti generati dal traffico veicolare nella città di Messina.

L'area urbana della città, ubicata in corrispondenza della zona di costa siciliana più prossima alla penisola continentale, è infatti interessata da elevati carichi veicolari, dovuti soprattutto ai flussi di attraversamento e scambio che collegano l'isola siciliana al continente e che costituiscono la principale sorgente di inquinamento ambientale.

L'intervento esaminato, previsto dal Piano Regolatore Portuale della città, ancora in fase di approvazione, consiste nello spostamento dell'attività di traghettamento fra le due sponde dello Stretto dal Porto di Messina al Porto di Tremestieri, collocato nella periferia sud della città, liberando in tal modo il centro cittadino dal traffico di attraversamento.

L'analisi presentata, che ha consentito una stima degli effetti che le modifiche ai flussi veicolari previste dal Piano Regolatore Portuale provocheranno sulla componente atmosfera, è stata condotta utilizzando una metodologia che fa riferimento al metodo Copert III dell'European Environment Agency, tramite il quale è stato possibile valutare le emissioni dovute alle singole componenti del traffico veicolare, in relazione sia alla tipologia di veicolo, che alla classe emissiva, all'alimentazione ed alla cilindrata.

INTRODUZIONE

Il livello di qualità dell'aria nei centri urbani è fortemente condizionato dalla presenza di numerosi inquinanti, la maggior parte dei quali originati dal traffico veicolare.

In particolare la città di Messina presenta marcati livelli di inquinamento, essendo interessata da elevati carichi veicolari, connessi sia alle attività del centro urbano che al traffico di attraversamento, dovuto ai mezzi in traghettamento attraverso le due sponde dello Stretto che, prima di poter accedere alle arterie autostradali, sono costretti a percorrere un notevole tragitto all'interno del centro urbano della città.

L'Autorità portuale di Messina ha da tempo avviato l'iter di approvazione di un Piano Regolatore Portuale, che definisce l'organizzazione complessiva del porto, ivi comprese le aree destinate alla produzione industriale, all'attività cantieristica, le infrastrutture stradali e ferroviarie, e individuando altresì le caratteristiche e la destinazione funzionale delle aree interessate.

La finalità principale del Piano è quella di ridefinire un equilibrato sistema di rapporti fra porto e città, sia reinterpretando priorità e funzioni dell'uno, che restituendo all'altra il diritto ad affacciarsi sul mare; in altre parole l'obiettivo del piano è definire uno sviluppo dei traffici marittimi che colga tutte le opportunità offerte dal territorio e dal mercato e, senza sacrificare le risorse utili alle attività portuali, contestualmente liberi quelle non essenziali e le renda disponibili per un nuovo assetto della città sul suo frontemare.

In tale ambito, che prevede una serie di interventi volti alla modifica dell'attuale assetto dell'area portuale, quali la riorganizzazione del lungomare, lo spostamento della Fiera, l'ampliamento del terminale crociere e la ristrutturazione dell'area occupata dalla cittadella militare, grande importanza viene attribuita alla riduzione del carico inquinante dovuto al traffico veicolare. A tal fine il principale intervento previsto consiste nello spostamento dell'attività di traghettamento dall'area del Porto di Messina e della zona immediatamente limitrofa dell'approdo S. Francesco verso quella del Porto di Tremestieri, collocato nella periferia sud della città, a circa 10 km dal centro storico (Figura 1).

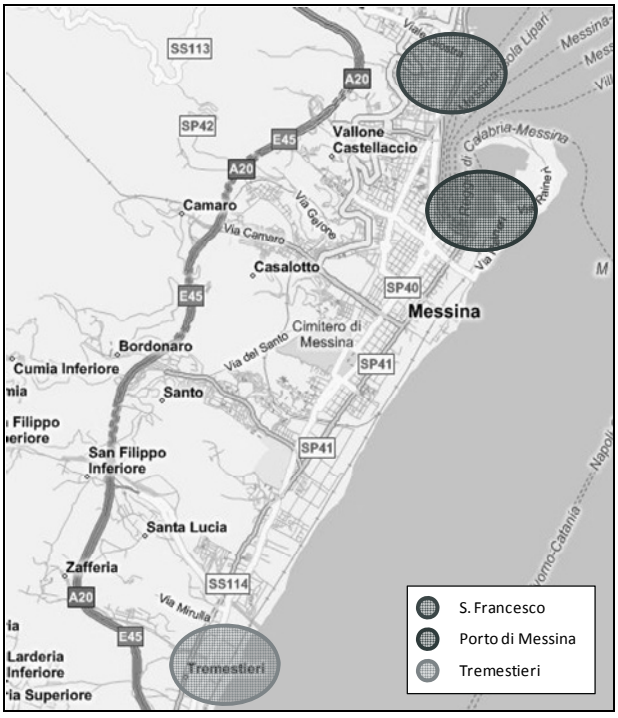


Figura 1: Collocazione geografica degli approdi nei porti di Messina e Tremestieri.

Al fine di consentire una stima degli effetti che le modifiche ai flussi veicolari previste dal Piano Regolatore Portuale provocheranno sulla componente atmosfera, nel presente studio è stata condotta un'analisi volta a valutare le emissioni dei principali inquinanti generati dal traffico veicolare nelle aree interessate dall'intervento, ante e post operam.

Per la valutazione della mobilità è stato fatto riferimento al Piano Urbano della Mobilità di Messina [1] ed alle previsioni contenute nel Piano Regolatore Portuale di Messina [2]; per il calcolo dei fattori di emissione degli inquinanti è stata utilizzata una metodologia che trae spunto dal metodo Copert III dell'European Environment Agency [3].

METODOLOGIA DI CALCOLO DELLE EMISSIONI

Per il calcolo delle emissioni inquinanti viene utilizzata una metodologia di stima che, partendo da dati relativi al parco veicolare circolante, utilizza per ogni componente emissivamente omogenea dello stesso una funzione di emissione dipendente dalla velocità di marcia del veicolo. La funzione di emissione, oltre ad essere legata alla velocità, dipende dall'alimentazione, dalla cilindrata (o, per i mezzi commerciali, dal peso) e dall'età del veicolo. Dalla funzione di emissione per le varie componenti veicolari si perviene quindi ad una curva di emissione media del parco che moltiplicata per il numero di veicoli e per la loro percorrenza media consente di determinare le emissioni inquinanti complessive [4].

Per applicare la procedura, è necessario inizialmente effettuare la disaggregazione del parco veicolare circolante in gruppi omogenei per alimentazione, cilindrata o peso ed età, quest'ultima in termini di epoca normativa di emissione.

Per ogni categoria di veicoli e per ogni inquinante vengono determinati quindi, per un'assegnata velocità, i fattori di emissione, utilizzando la seguente equazione:

$$FE_{ijjh} = f_{ijkh}\left(a_{ijkh} + b_{ijkh}v^{c_{ijkh}} + d_{ijkh}v^2\right) \quad (1)$$

dove i caratterizza l'i-esimo inquinante, j la categoria emissiva del veicolo, k la sua alimentazione ed h la sua cilindrata o il suo peso. Il fattore di emissione viene espresso in grammi di inquinante per chilometro percorso (g/km) ed i valori dei coefficienti a, b, c, d, f sono tratti dal metodo Copert III [3].

Nota la composizione annuale del parco per ogni classe veicolare omogenea, viene quindi determinato, per un'assegnata velocità, il fattore di emissione medio annuale del parco veicolare per l'i-esimo inquinante, nell'anno di riferimento considerato, tramite la relazione:

$$\overline{FE_i}\Big|_{anno} = \sum_{N.categorie} FE_{ijkh}\, p_j\, p_k\, p_h\Big|_{anno} \quad (2)$$

in cui p_j, p_k e p_h indicano rispettivamente le percentuali di veicoli della j-esima categoria emissiva, con k-esima alimentazione e con h-esima cilindrata o peso, circolanti nell'anno in esame.

Il prodotto tra il fattore di emissione medio annuale, il numero totale di veicoli circolanti, N, e la percorrenza media dei veicoli, d, fornisce le emissioni inquinanti complessive per l'i-esimo inquinante riferite al parco circolante nell'anno in esame:

$$E_i\Big|_{anno} = \overline{FE_i}\Big|_{anno} \times N \times d \quad (3)$$

APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA

Utilizzando la metodologia in precedenza descritta, è stato possibile valutare l'effetto degli interventi previsti dal Piano Regolatore Portuale di Messina sull'inquinamento atmosferico della sua area urbana; la valutazione è stata condotta in termini di variazione delle emissioni inquinanti fra le condizioni ante e post-operam. La procedura ha previsto le seguenti fasi:

1. determinazione della composizione del parco veicolare circolante nel 2005, prima dell'intervento e nel 2015, ad intervento realizzato;
2. determinazione dei fattori di emissione degli inquinanti per ogni componente emissivamente omogenea del parco;
3. determinazione del fattore di emissione medio annuale, per ogni inquinante, nel 2005 e nel 2015;
4. calcolo della variazione della domanda di trasporto dal 2005 al 2015;
5. calcolo delle emissioni del parco veicolare al 2005 ed al 2015.

Per tali analisi sono stati utilizzati dati provenienti da:

– Piano Urbano della Mobilità del Comune di Messina [1];
– Piano Regolatore Portuale di Messina [2];
– Conto Nazionale dei Trasporti e delle Infrastrutture [5],

mentre per il calcolo dei fattori di emissione degli inquinanti è stato utilizzato il metodo Copert III [3].

Composizione del parco veicolare

La composizione del parco veicolare circolante prima dell'intervento, riportata in Tabella 1, è stata desunta dal Conto Nazionale dei Trasporti e delle Infrastrutture (2005) [5].

Tabella 1: Composizione del parco veicolare al 2005.

Tipologia	Numero di veicoli	%
Autovetture	34.667.485	69.0
Mezzi commerciali stradali	10.542.969	21.0
Motoveicoli	4.938.359	9.8
Bus	94.437	0.2
Totale	**50.243.250**	**100**

Utilizzando il Conto Nazionale dei Trasporti è stato anche possibile determinare la distribuzione delle principali componenti del parco veicolare in base all'età, all'alimentazione ed alla cilindrata.

Nota la composizione del parco veicolare circolante negli anni compresi tra il 1980 ed il 2005, è stata effettuata quindi un'ipotesi di evoluzione tendenziale dello stesso, estrapolando al 2015 gli andamenti dei dati disponibili; l'analisi, condotta separatamente per le autovetture e per i mezzi commerciali stradali, è stata espressa sia in termini di numerosità del parco che di distribuzione dello stesso per età, alimentazione e cilindrata o peso.

E' stata effettuata in particolare l'assunzione che la distribuzione del parco in classi di età si mantenga costante dal 2005 al 2015 e che la distribuzione in categorie di peso dei mezzi commerciali stradali per il 2005 sia uguale a quella del 2015. I risultati ottenuti per le autovetture sono riportati nelle Figure 2, 3, 4.

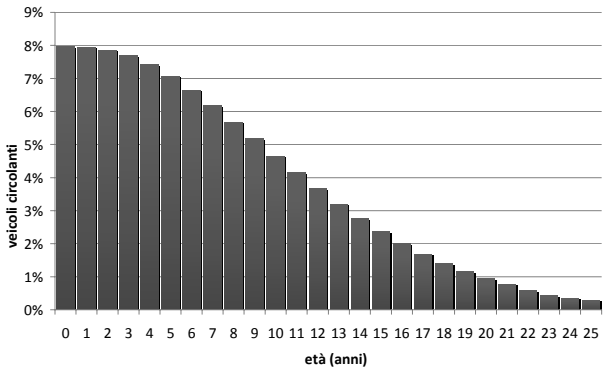


Figura 2: Distribuzione delle autovetture in base all'età.

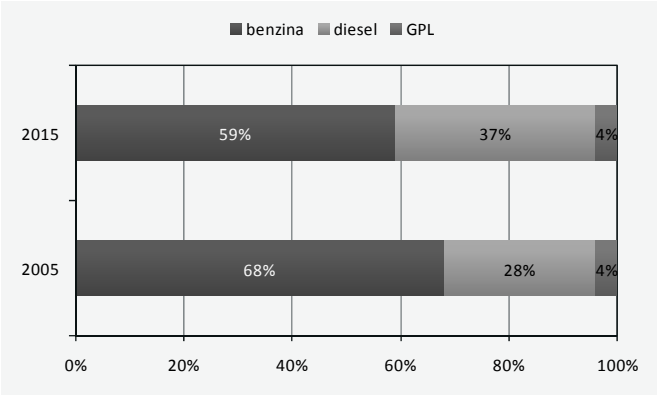


Figura 3: Distribuzione delle autovetture in base all'alimentazione.

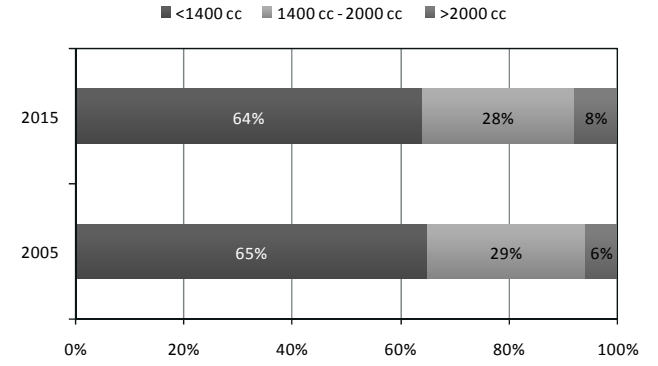


Figura 4: Distribuzione delle autovetture in base alla cilindrata.

Al fine di suddividere il parco in categorie emissivamente omogenee, è stato inoltre necessario individuare la classe emissiva dei veicoli; a tal proposito la Commissione europea ha emanato una serie di Direttive, volte alla regolamentazione delle emissioni inquinanti dei veicoli. A riguardo le categorie attualmente in vigore vanno dalla EURO I alla EURO IV; ad esse nei prossimi anni si aggiungeranno le categorie EURO V ed EURO VI, che entreranno in vigore rispettivamente dall'1/1/2011 e dall'1/9/2015.

Conoscendo la distribuzione per età e la consistenza del parco veicolare e facendo riferimento alle date di introduzione dei provvedimenti comunitari relativi alle emissioni dei veicoli, riportate in Tabella 2, è stato possibile determinare il numero di veicoli appartenenti alle singole categorie emissive sia per il 2005 che per il 2015.

I veicoli ancora circolanti al 2005 ed al 2015 immatricolati prima del 1993 sono stati assegnati alla classe PRE-EURO.

Tabella 2: Categorie emissive dei veicoli.

Categoria	Data di entrata in vigore
PRE EURO	prima del 1/1/1993
EURO I	1/1/1993
EURO II	1/1/1997
EURO III	1/1/2001
EURO IV	1/1/200
EURO V	1/1/2011
EURO VI	1/9/2015

La distribuzione del parco veicolare per categorie emissive è riportata, in termini percentuali, in Figura 5.

Partendo dai dati relativi all'alimentazione, alla cilindrata ed alla categoria emissiva dei veicoli per gli anni 2005 e 2015 è stato possibile suddividere le singole componenti del parco circolante in classi emissivamente omogenee.

Un esempio, riferito alle sole autovetture circolanti nel 2005, è riportato in Tabella 3.

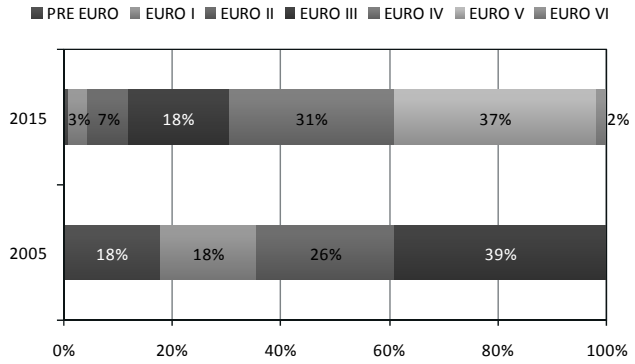


Figura 5: Distribuzione del parco veicolare in base alla categoria emissiva.

Tabella 3: Distribuzione delle autovetture circolanti nel 2005 in classi emissivamente omogenee.

Al\imentazione	Cilindrata	Categoria	Percentuale
Benzina	<1400	PRE EURO	8.1%
		EURO I	8.0%
		EURO II	11.5%
		EURO III	16.8%
	1400-2000	PRE EURO	3.5%
		EURO I	3.5%
		EURO II	5.1%
		EURO III	7.5%
	>2000	PRE EURO	0.7%
		EURO I	0.7%
		EURO II	1.1%
		EURO III	1.6%
Diesel	<1400	PRE EURO	3.3%
	1400-2000	PRE EURO	1.5%
	>2000	PRE EURO	0.3%
	tutte	EURO I	5.0%
		EURO II	7.3%
		EURO III	10.6%
GPL	tutte	PRE EURO	0.7%
		EURO I	0.7%
		EURO II	1.0%
		EURO III	1.5%

Fattori di emissione degli inquinanti

Infine, per poter pervenire alla valutazione delle emissioni inquinanti dovute al traffico veicolare, è stato necessario conoscere i fattori di emissione degli inquinanti per ogni categoria emissivamente omogenea individuata in precedenza.

Tali fattori sono stati determinati facendo riferimento al metodo Copert III [3], dal quale sono stati tratti, per ogni categoria emissiva e per ogni inquinante, i valori dei coefficienti da inserire nell'Eq. (1).

I vari fattori di emissione sono stati quindi calcolati per una velocità media del deflusso di 30 km/h, facendo riferimento al Piano Urbano della Mobilità di Messina [1].

Fattori di emissione medi

Noti i fattori di emissione per ogni componente emissivamente omogenea del parco veicolare e la sua suddivisione percentuale nelle stesse categorie, applicando l'Eq. (2) sono stati determinati i fattori medi di emissione delle autovetture e dei mezzi commerciali stradali, per i vari inquinanti, relativamente agli anni 2005 e 2015 (Tabella 4).

Tabella 4: Fattori medi di emissione del parco veicolare.

Componente traffico	Inquinante	Fattore emissione medio (g/km)	
		Anno 2005	Anno 2015
Autovetture	CO	2.998	1.132
	COV	0.327	0.071
	NOx	0.697	0.263
	PM	0.028	0.017
Mezzi commerciali stradali	CO	1.872	0.856
	COV	1.164	0.721
	NOx	2.127	0.999
	PM	0.168	0.056

Domanda di trasporto

Come già riportato in precedenza, gli interventi previsti dal Piano Regolatore Portuale di Messina comporteranno il trasferimento integrale dell'intera attività di traghettamento di automobili e mezzi commerciali stradali dal Porto di Messina al Porto di Tremestieri, che accoglierà quindi nel 2015, oltre al traffico dovuto ai mezzi commerciali stradali che attualmente già sopporta, anche quello delle autovetture che, nel 2005, viene smaltito dagli approdi S. Francesco e Porto di Messina.

Gli attuali volumi di traffico dovuti al traghettamento dello Stretto e quelli previsti all'anno 2015, riportati in termini di veicoli/giorno in Tabella 5, sono stati determinati sulla base dei dati ricavabili dal Piano Urbano della Mobilità [1] e dal Piano Regolatore Portuale di Messina [2].

Tabella 5: Flussi veicolari attraverso lo Stretto. Giorno feriale medio.

Approdo	Flusso giornaliero (veic/giorno)			
	Anno 2005		Anno 2015	
	Autovetture	Mezzi commerciali stradali	Autovetture	Mezzi commerciali stradali
S. Francesco	4096	0	0	0
Porto ME	1531	0	0	0
Tremestieri	0	2936	6470	3685

Emissioni inquinanti

Infine, essendo le emissioni rilasciate in atmosfera strettamente legate alla lunghezza del tragitto percorso dai veicoli attraverso la rete urbana, è stato necessario determinare le distanze medie percorse dai veicoli dai singoli approdi fino al più vicino svincolo autostradale (Tabella 6).

Tabella 6: Lunghezza media degli spostamenti dagli approdi portuali agli svincoli autostradali.

Approdo	Svincolo autostradale	Lunghezza (km)
S. Francesco	Messina Boccetta	4.0
Porto ME	Messina Centro	4.5
Tremestieri	Messina Sud – Tremestieri	1.8

Note le lunghezze medie degli spostamenti, i fattori di emissione medi e i flussi veicolari delle componenti del traffico, le emissioni giornaliere dovute al traffico dei veicoli in traghettamento al 2005 ed al 2015 sono state infine determinate utilizzando l'Eq. (3).

RISULTATI

Le emissioni calcolate tramite l'applicazione della metodologia, distinte per approdo, categoria veicolare, ed inquinante sono riportate nelle Tabelle 7 ed 8, rispettivamente per l'anno 2005 e per l'anno 2015.

Tabella 7: Emissioni inquinanti giornaliere prodotte dal traffico dei veicoli in traghettamento. Anno 2005.

Approdo	Emissioni (kg/giorno)							
	Autovetture				Mezzi commerciali stradali			
	CO	COV	NOx	PM	CO	COV	NOx	PM
S. Francesco	49.1	5.4	11.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Porto ME	20.7	2.3	4.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Tremestieri	0.0	0.0	0.0	0.0	9.9	6.2	11.2	0.9
Totale	**69.8**	**7.6**	**16.2**	**0.7**	**9.9**	**6.2**	**11.2**	**0.9**

Tabella 8: Emissioni inquinanti giornaliere prodotte dal traffico dei veicoli in traghettamento. Anno 2015.

Approdo	Emissioni (kg/giorno)							
	Autovetture				Mezzi commerciali stradali			
	CO	COV	NOx	PM	CO	COV	NOx	PM
S. Francesco	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Porto ME	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tremestieri	13.2	0.8	3.1	0.2	5.7	4.8	6.6	0.4
Totale	**13.2**	**0.8**	**3.1**	**0.2**	**5.7**	**4.8**	**6.6**	**0.4**

Nella Tabella 9 sono invece riportati i risultati aggregati per tutta l'area interessata dall'intervento, suddivisi per anno e per inquinante; nella stessa Tabella sono inoltre riportate le aliquote di riduzione delle emissioni dei singoli inquinanti determinate dall'intervento ipotizzato.

Tabella 9: Emissioni totali nell'area interessata all'intervento prodotte negli anni 2005 e 2015 dal traffico dei veicoli in traghettamento.

Inquinante	Emissioni (kg/giorno)		Riduzione carico emissivo (%)
	2005	2015	
CO	79.7	18.9	76.3
COV	13.8	5.6	59.2
NOx	27.5	9.7	64.7
PM	1.5	0.6	63.1

È possibile notare come lo spostamento delle autovetture da Messina a Tremestieri, anche se numericamente rilevante (Tabella 5), non comporterà nel 2015, in quest'ultima zona, un incremento delle emissioni rispetto a quelle presenti nel 2005, imputabili ai soli mezzi commerciali stradali.

Infatti, per effetto della riduzione dei fattori di emissione degli inquinanti prevista per il 2015 per tutto il parco circolante, ed in considerazione del fatto che, comunque, il contributo emissivo di una autovettura è notevolmente ridotto rispetto a quello dei mezzi commerciali stradali, anche a fronte di un notevole spostamento del traffico dovuto alle autovetture dal porto di Messina a quello di Tremestieri, si registrerà in quest'ultima zona una riduzione del carico emissivo per tutti gli inquinanti considerati (CO, COV, NOx, PM), rispetto al 2005, con la sola eccezione del monossido di carbonio.

Infine, anche la riduzione della lunghezza dei tragitti delle autovetture tra i terminali traghetti e gli svincoli autostradali fornirà un ulteriore contributo alla riduzione delle emissioni complessive nelle due aree interessate (Tabella 6).

I risultati ottenuti, per ogni inquinante, negli anni 2005 e 2015, sono riportati nelle Figure 6, 7, 8 e 9, distinguendo le aliquote dovute alla autovetture da quelle dovute ai mezzi commerciali stradali.

Nella Figura 10 vengono quindi confrontate, per ogni inquinante, le emissioni totali presenti nel 2005 e nel 2015 nell'intero ambito comprendente il porto di Messina e quello di Tremestieri; infine nella Figura 11 vengono riportate, in termini percentuali, le riduzioni complessive delle emissioni nell'area.

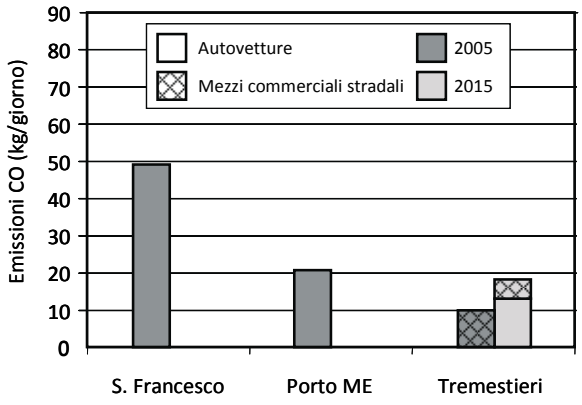


Figura 6: Emissioni di CO prodotte dal traffico dei veicoli in traghettamento.

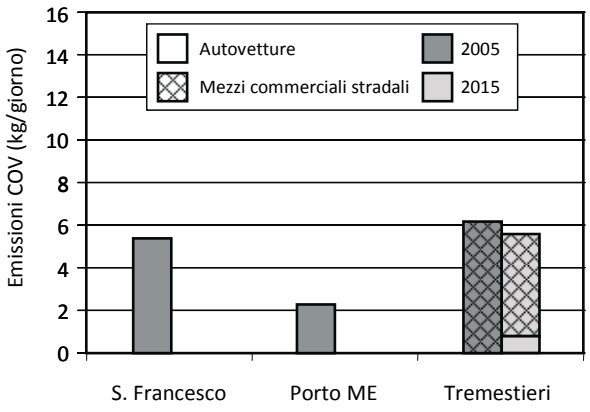


Figura 7: Emissioni di COV prodotte dal traffico dei veicoli in traghettamento.

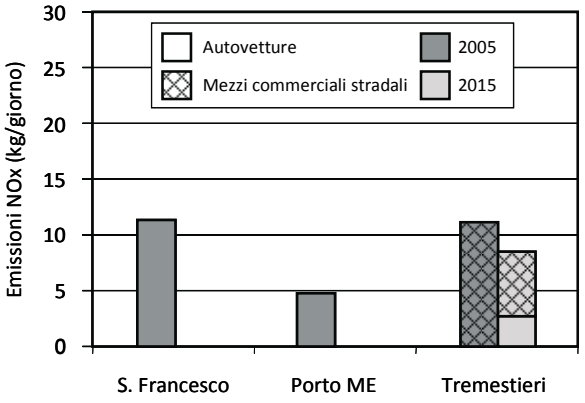


Figura 8: Emissioni di NOx prodotte dal traffico dei veicoli in traghettamento.

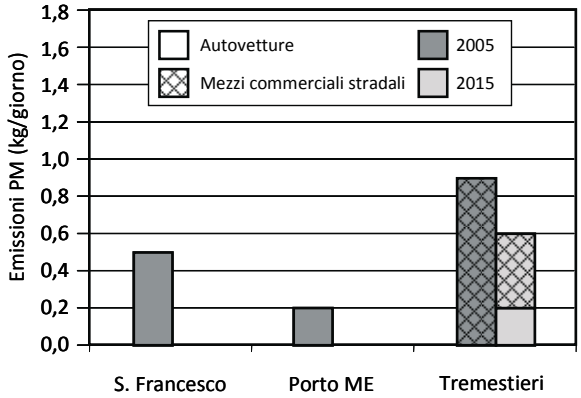


Figura 9: Emissioni di PM prodotte dal traffico dei veicoli in traghettamento.

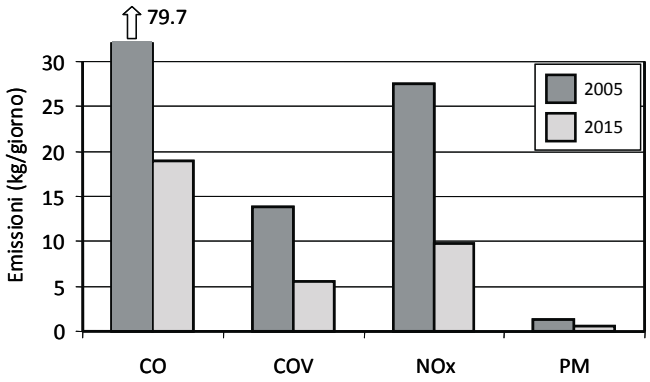


Figura 10: Confronto fra le emissioni complessive negli anni 2005 e 2015.

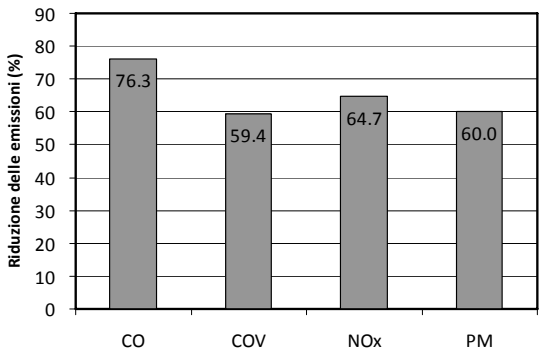


Figura 11: Riduzione delle emissioni complessive prodotte dallo spostamento del traffico dei veicoli in traghettamento al Porto di Tremestieri.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati determinati gli effetti sulla componente atmosfera di un intervento mirato alla riduzione dei carichi inquinanti generati dal traffico veicolare nella città di Messina, consistente nello spostamento, previsto per il 2015, dell'attività di traghettamento delle autovetture, attualmente interessante l'area del Porto di Messina e della zona immediatamente limitrofa dell'approdo S. Francesco, verso quella del Porto di Tremestieri, collocato nella periferia sud della città, a circa 10 km dal centro storico, che attualmente movimenta solo mezzi commerciali.

Dall'analisi condotte emerge che l'intervento previsto produrrà una notevole riduzione delle emissioni inquinanti complessive nell'area oggetto di indagine.

Limitatamente alla zona di Tremestieri, verso cui sarà spostato tutto il traffico di traghettamento, l'intervento non comporterà inoltre alcun incremento delle emissioni, che al contrario subiranno una considerevole riduzione.

Tale risultato è determinato dalla riduzione dei fattori di emissione, conseguente all'evoluzione del parco circolante, prevista per l'anno 2015 ed è inoltre conseguente al fatto che il contributo emissivo di una autovettura è notevolmente ridotto rispetto a quello dei mezzi commerciali stradali: tali elementi giocano infatti un ruolo molto più rilevante sulla generazione di emissioni rispetto all'incremento dei flussi veicolari dovuto allo spostamento delle autovetture.

Infine, anche la riduzione della lunghezza dei tragitti delle autovetture tra i terminali traghetti e gli svincoli autostradali fornirà un ulteriore contributo alla riduzione delle emissioni complessive nell'area interessata dall'intervento.

NOMENCLATURA

Simbolo	Descrizione	u.m.
a,b,c,d,f	Coefficienti	
FE	fattore di emissione	g $km^{-1}veic^{-1}$
$\overline{FE}$	fattore di emissione medio annuale	g $km^{-1}veic^{-1}$
p	percentuale di veicoli	%
v	Velocità	km h^{-1}
N	numero totale di veicoli circolanti	veic
d	percorrenza media dei veicoli	km
E	emissioni inquinanti complessive	g

Pedici	Descrizione
I	Inquinante
J	categoria emissiva
K	Alimentazione
H	cilindrata o peso

BIBLIOGRAFIA

1. Comune di Messina, Assessorato alla Mobilità, Piano Urbano della Mobilità, Messina, 2006.
2. Autorità Portuale di Messina, Piano Regolatore Portuale, Messina, 2007.
3. L. Ntziachristos and Z. Samaras, COPERT III - Computer programme to calculate emissions from road transport: Methodology and emission factors, Technical report No 49, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 2000.
4. A. Nucara, G. Rizzo, G. Rodonò, G. Scaccianoce, Introducing new indicators for assessing pollutant emission scenarios of urban traffic sector. Proceedings of: XVIII International Conference "Science and Motor Vehicles", pp 127-130, Belgrado, 2001.
5. Ministero dei Trasporti e Ministero delle Infrastrutture, Conto Nazionale dei Trasporti e delle Infrastrutture, Anno 2005, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 2005.

LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE ALL'INTERNO DEGLI EDIFICI PER RADIAZIONI IONIZZANTI E NON

Giovanni Nicoletti, Gerardo Nicoletti

Università della Calabria, Dipartimento di Meccanica,
87030 Arcavacata di Rende (CS), Italy

SOMMARIO

L'inquinamento da radiazioni ionizzanti e non, all'interno degli edifici, o, più genericamente, in ambienti confinati, rimane sempre più un problema centrale per il benessere fisiologico e sanitario delle persone ivi presenti. Esso, sostanzialmente, si riconduce alla presenza nell'aria di tali ambiti indoor sia di radon come fonte radioattiva che di onde elettromagnetiche quali radiazioni non ionizzanti.

Dopo un'ampia illustrazione dei suddetti contaminanti fisici dell'aria indoor, la presente nota, articolandosi in più capitoli, propone un metodo analitico di valutazione dell'impatto ambientale per le radiazioni ionizzanti e non presenti nell'ambiente interno di che trattasi.

Si tenta, praticamente, di definire, con un opportuno algoritmo, un indice complessivo, variante tra 0 ed 1 che quantifichi per l'interno degli edifici l'impatto ambientale connesso a tali inquinanti, determinando, così, una nuova procedura per il suo calcolo dell'impatto.

In definitiva, si potrà asserire che la suddetta metodologia di valutazione dell'impatto ambientale potrà rappresentare, da un lato, in un prossimo futuro, un mezzo facilmente intelligibile per il cittadino nel controllo interno delle radiazioni ionizzanti e non.

Dall'altro lato, invece, essa rappresenterà uno strumento semplice ed efficace nelle mani del Tecnico progettista e del Legislatore per avviare programmi seri e credibili di tutela della salute pubblica per inquinamenti indoor da radon ed da onde elettromagnetiche.

1. INTRODUZIONE

La qualità dell'aria all'interno di ambienti confinati di pende da numerosi inquinanti fisici, chimici e biologici che normalmente si ritrovano in tali ambiti.

Tra questi meritano particolare menzione, sia per importanza che per pericolosità, quelli di natura prettamente fisica: i campi elettromagnetici e l'attività nucleare del radon.

Infatti, oggigiorno, l'inquinamento da radiazioni ionizzanti (radon) e non (onde elettromagnetiche) rimane, sempre più, un problema centrale per il benessere fisiologico e sanitario delle persone esposte a tali agenti nocivi.

Appare, dunque, estremamente importante deline-are, una volta per tutte, una rigorosa procedura ambientale che possa quantificare, negli ambienti confinati, il rischio alla esposizione sia di radiazioni nucleari da radon che di onde elettromagnetiche ad alta nonché bassa frequenza.

La presente nota, articolandosi in tre parti, propone sommariamente delle linee guida, puramente opera-tive, che possano indirizzare il Tecnico a redigere, in modo chiaro e semplice, per radiazioni ionizzanti e non, uno studio di impatto ambientale all'interno di edifici o, più genericamente, in ambienti confinati.

Nella prima parte si affronta organicamente e quantitativamente con la definizione di due indici di qualità ambientale l'inquinamento da radon negli ambienti chiusi.

Il radon è un gas radioattivo, classificato dall'O.M.S, insieme ai suoi prodotti di decadimento, come agente cancerogeno di gruppo **1**: l'esposizione al radon è considerata la seconda causa, dopo il fumo di sigarette, di cancro polmonare.

Essendo un gas può fuoriuscire da un materiale solido attraverso condotti comunicanti con l'esterno e, quindi, materiali litici come le pozzolane polverizzate, i cementi, i pannelli di gesso e gli inerti granitici, emettono molto più radon di quanto ne emettano gli stessi materiali nelle loro forme originali, cioè integri (tufi, calcari, graniti).

Da questo discende che l'inquinamento indoor da radon è influenzato dai materiali con cui sono stati costruiti tali manufatti nonché dalle rocce ove essi affondano.

Nella seconda parte viene considerato con l'introduzione di altri indici ambientali, l'impatto alle radiazioni non ionizzanti negli ambienti confinati.

Esso trae origine dalla diffusione negli ambienti chiusi considerati di campi elettrici e magnetici. I primi, peraltro facilmente schermabili, si rifanno alla tensione elettrica; mentre i secondi, ben più pericolosi, dipendono dall'intensità della corrente che circola nei conduttori.

L'inquinamento elettromagnetico indoor viene così quantificato con un indice complessivo che varia tra 0 ed 1.

Nella parte finale si tenta di mettere insieme questi indici per definire il rischio complessivo associato all'emissione negli ambienti confinati sia di radon che di onde elettromagnetiche.

Questa metodologia di valutazione dell'impatto ambientale da radiazioni ionizzanti e non negli ambienti chiusi costituisce, a nostro modo di vedere, da un lato, un mezzo facilmente intelligibile per il cittadino di controllare il livello di relativo inquinamento effettivamente presente.

Dall'altro lato, invece, potrà rappresentare uno strumento semplice ed efficace nelle mani del Tecnico progettista e del Legislatore per la stesura di seri e credibili programmi operativi di tutela della salute pubblica negli ambienti indoor.

2. LA CONTAMINAZIONE INDOOR DA RADON

Quando si parla di radon si intende in genere l'iso-topo ^{222}Rh, che è un prodotto del decadimento del radio (^{226}Ra), discendente, a sua volta, dall'uranio (^{238}U). Sia l'uranio che il radio sono elementi chimici pesanti, presenti un po' ovunque sulla crosta terrestre, variabili a seconda della zona geografica considerata.

A differenza dei suoi progenitori, il radon è un gas nobile, quindi in grado di risalire, senza reagire con altre sostanze, dagli strati superiori della crosta terrestre fino alla superficie, infiltrandosi, ad esempio, nelle fondamenta dei diversi manufatti edilizi.

L'entità di emissione di radon da parte del suolo dipende sia dai diversi fattori fisici propri del terreno in questione che dai variegati parametri meteorologici della zona.

Tra questi menzioniamo:

a) <u>caratteristiche del sito</u>
   - contenuto di radio nel suolo ove è fondato il manufatto;
   - esalazioni dal suolo;
   - permeabilità del terreno costituente il sito;
   - presenza di faglie in vicinanze dell'edificio.

b) <u>caratteristiche dell'edificio</u>
   - materiali impiegati e tipologia edilizia;
   - tecnica costruttiva e destinazione d'uso dei diversi locali costituente il manufatto;
   - stato e manutenzione dell'edificio;
   - contenuto di radio e radon nell'acqua ivi utilizzata.

c) <u>caratteristiche ambientali del sito</u>
   - temperatura, pressione e umidità;
   - condizioni meteorologiche presenti (vento, pioggia etc.).

Dal punto di vista fisico si ha che terreni molto porosi ed asciutti favoriscono la diffusione di questo gas (radon); invece, terreni umidi e più compatti costituiscono una valida barriera per la sua emersione in superficie.

Dal punto di vista meteorologico sembra che una diminuzione della pressione atmosferica conduca a livelli emissivi di radon più elevati.

La concentrazione di radon all'interno di ambienti confinati è connessa a fonti interne (emissioni provenienti sia dai materiali edilizi impiegati che dall'acqua usata nella prassi igienica-sanitaria quotidiana) ed a quelle esterne (penetrazione di radon sia per infiltrazione di aria esterna che dal terreno di fondazione).

La legislazione europea prescrive all'interno degli ambienti confinati una concentrazione di radon massima ammissibile pari, rispettivamente a 400 Bq/m^3 per gli edifici esistenti o vecchi e a 200 Bq/m^3 per gli edifici di nuova costruzione.

L'inquinamento da radon è valutato attraverso la definizione di due indici di qualità ambientale che risultano connessi alla sua nocività e al suo potere penetrativo dall'esterno.

Indice di nocività del radon

Questo indice, connesso con la quantità di radon presente nell'ambiente indoor di che trattasi, risulta così definito:

$$i_N = 1 - \frac{c_m}{c_a}$$

Abbiamo indicato con:

- c_a = concentrazione di radon ammissibile consigliata (Bq/m^3);
- c_m = concentrazione di radon misurata (Bq/m^3).

La concentrazione ammissibile raccomandata da una direttiva dell'U.E. si attesta, rispettivamente, su livelli di 400 Bq/m^3 per edifici vecchi e di 200 Bq/m^3 per edifici nuovi.

Un tale indice varierà tra 0 ed 1.

Un valore di $i_N = 0$ riguarda un ambiente indoor con forte presenza di tale gas; mentre $i_N = 1$ significa trattarsi di un ambiente totalmente salubre in relazione a questo radionuclide. Quando si ha una concentrazione misurata maggiore di quella ammissibile il suddetto indice perde di ogni significato.

L'andamento di tale indice, normalizzato rispetto al valore massimo, cioè

$$i_N^0 = \frac{i_N}{i_{N\,max}}$$

è rappresentato in funzione della concentrazione di radon, secondo i diversi ricambi di aria previsti per il particolare ambiente indoor, nella figura 1.

Si nota per tale indice la differenza che sussiste tra vecchi e nuovi edifici.-

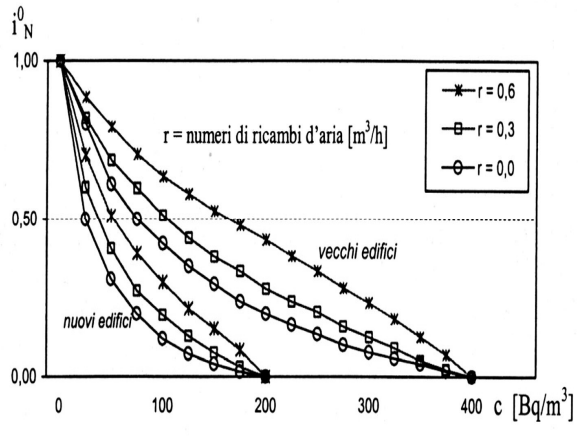


Fig. 1: Nocività del radon

Indice di penetrazione del radon

Le caratteristiche strutturali del manufatto, in relazione alle condizioni sitologiche, geologiche e meteo-rologiche del luogo ove esso insiste, determinano nel

suo interno una maggiore o minore presenza di un siffatto gas radioattivo.

La quantificazione di tale contaminazione potrà determinarsi attraverso l'introduzione del sottoriportato indice adimensionale, variante anch'esso tra 0 ed 1.

$$i_P = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} S_i\, l_i\right) \frac{\rho_r - \rho_m}{\rho_m}}{V_T}$$

dove abbiamo indicato con:

- n = numero di pareti di delimitazioni dal terreno;
- S = superficie della i-esima parete (m^2);
- l = lunghezza o diametro della via di diffusione del gas (m);
- ρ_r = densità media dei radionuclidi

connessi con il radon (kg/m^3);

- ρ_m = densità media dei materiali edili impiegati per l'i-esima parete (kg/m^3);
- V_T = volume dell'ambiente confinato.

Tale indice, normalizzato rispetto al valore massimo $\left(i_P^0\right)$, è rappresentato in funzione delle vie di penetrazione, dalla figura 2.

In essa è rappresentata la capacità del radon di penetrare all'interno del manufatto edilizio a seconda della pressione dell'aria ivi presente.

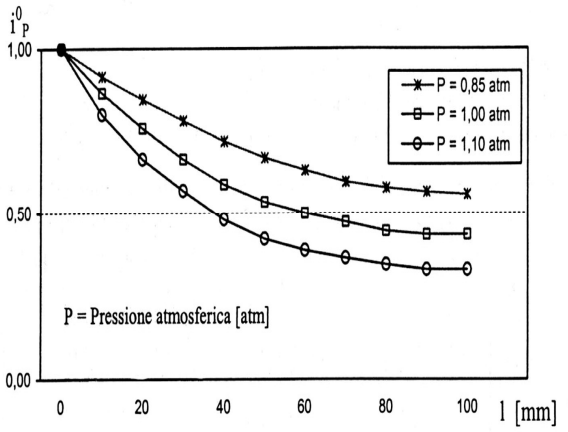


Fig. 2: Penetrazione del radon

3. L'IMPATTO DA RADIAZIONI NON IONIZZANTI

Solo recentemente, a seguito di indagine epide-miologiche sempre più diffuse, la collettività ha preso coscienza del cosiddetto elettrosmog o inquinamento da onde elettromagnetiche.

Tale fenomeno trae origine dalla diffusione nell'ambiente indoor in esame sia di campi elettrici che magnetici, dovuti, sostanzialmente alla presenza di correnti elettriche di diversa frequenza ivi circolanti.

Ne consegue che a seconda della frequenza parleremo di campi ad alta frequenza se compresi tra 80 MHz e 50 GHz (radio, televisione, telefoni cellulari etc.) o di bassa frequenza se variabili tra 30 Hz e 300 Hz (linee elettriche).

L'intensità di campo elettrico, correlata alla tensione, si misura in V/m; mentre l'intensità di campo magnetico dipende dalla corrente che circola e si misura in A/m o, per unità sottomultiple, in microtesla (μT).

Negli ambienti abitati l'inquinamento elettroma-gnetico è dovuto principalmente all'energia elettrica a bassa tensione, che viene quotidianamente impiegata per la vita o per il lavoro domestico delle famiglie.

In questi casi, oltre alla contaminazione elettroma-gnetica di fondo per la particolare ubicazione dell'am-biente confinato in esame, si ritrovano onde elettromagnetiche ad alta frequenza per l'utilizzo in esso di forni a microonde, di telefoni cellulari, di videoterminali e di tanti altri elettrodomestici funzionanti ad oltre 80 MHz.

Bisogna dire che il campo elettrico è meno pericoloso per la salute dell'uomo in quanto esso risulta essere, rispetto a quello magnetico, facilmente schermabile.

Dall'analisi di alcune campagne di misure, effet-tuate all'interno di edifici, è emerso quanto segue:

- il campo magnetico di fondo a 50 Hz negli ambienti domestici presenta una notevole variabilità temporale a medio e breve termine, nella quale è possibile talvolta identificare una certa ciclicità giorno/notte;
- all'interno di un dato appartamento la misura presa al centro di una stanza rappresenta, in genere ed in modo abbastanza significativo, la media spaziale dei valori presenti nello stesso ambiente;
- i campi elettromagnetici risultano più elevati negli alloggi condominiali rispetto alle abitazioni mono e bifamiliari per l'influenza sia della diversità e complessità di cablaggio che per le maggiore aree ad uso comune ivi presenti.

In sostanza, l'inquinamento ambientale dovuto alle radiazioni indoor non ionizzanti (onde elettromagnetiche) è stato quantificato, similmente al radon, con due indici, che risultano correlati, rispettivamente, all'in-tensità di campo elettrico e di quello magnetico, esistenti nell'ambiente confinato di che trattasi.-

Definiamo, quindi, i seguenti sottoriportati due indici di qualità ambientale:

Indice di campo elettrico

$$i_E = 1 - \frac{E}{\left(10^{12} \cdot G\right) / \left(I \cdot D\right)}$$

dove:

- E= campo elettrico misurato (V/m);
- G = potenza installata (W);
- D = dimensione caratteristica del locale confinato (1/3 ∗ (b + h + l));
- I = corrente di linea (A);
- b = larghezza del locale (m);
- l = lunghezza del locale (m);
- h = altezza del locale (m).-

Indice di campo magnetico

$$i_H = 1 - \frac{H}{\left(10^{6} \cdot G\right) / \left(V \cdot d_f\right)}$$

dove:

- H = campo magnetico misurato (μT);
- V = tensione di linea (V);
- d_f = diametro del conduttore di terra (m).

Valori prossimi ad 1, sia di i_E che di i_H, indicano assenza di radiazioni non ionizzanti nell'ambiente interno considerato.

L'andamento degli indici normalizzati rispetto al massimo, cioè:

$$i_E^0 = \frac{i_E}{i_{E\,max}} \qquad i_H^0 = \frac{i_H}{i_{H\,max}},$$

è rappresentato, rispettivamente, nella Fig. 3 e Fig. 4.-

In tali figure si mostra la distribuzione spaziale della contaminazione elettromagnetica indoor rispetto alle potenze installate. Tali inquinamenti crescono con l'incremento della potenza elettrica installata nell'ambiente confinato in esame.

Lo spazio è misurato come distanza radiale dal baricentro del locale.

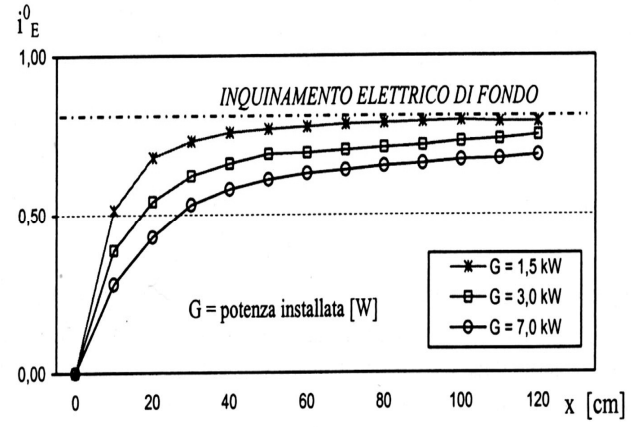


Fig. 3: Inquinamento elettrico indoor

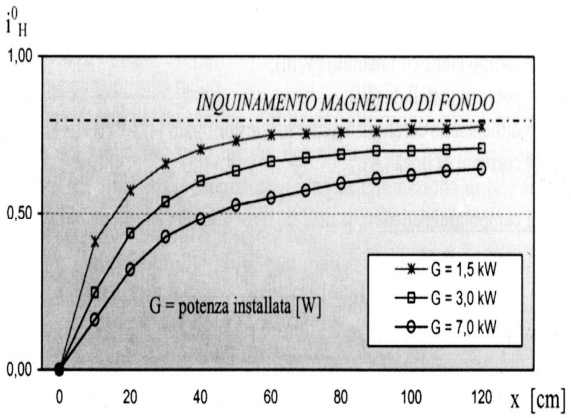


Fig. 4: Inquinamento magnetico indoor

4. CONCLUSIONI E COMMENTI

Dalla definizione dei precedenti indici ambientali possiamo proporre una nuova metodologia che valuti complessivamente l'impatto al radon ed a onde elettromagnetiche presenti negli ambienti confinati.-

Essa è incentrata sul calcolo del seguente algoritmo:

$$IA = \left(\prod_{1}^{q} i_k^0 \right)^{\frac{q}{q!}}$$

dove:

- IA = impatto ambientale complessivo;
- i_k^0 = indice normalizzato relativo al k-esimo impatto;
- q = numero di impatti.

Possiamo dedurre, anche, quello che è il rischio di esposizione in percentuale (R_{AF}%) a radiazioni ionizzanti e non negli ambienti interni, come:

$$R_{AF}\ \% = [1 - IA] \cdot 100 = \left[1 - \left(\prod_{1}^{q} i_k^0 \right)^{\frac{q}{q!}} \right] \cdot 100$$

La sensibilità dell'algoritmo testé proposto è demandata all'esponente q/q! che, di fatto, amplifica la dipendenza dai diversi parametri considerati.

Nel caso esaminato di contaminazione indoor per radon e campi magnetici ed elettrici tale rischio si e-splicita:

$$R_{AF}\ \% = \left[1 - \left(i_N^0 \cdot i_P^0 \cdot i_E^0 \cdot i_H^0 \right)^{\frac{4}{4!}} \right] \cdot 100$$

Una siffatta metodologia di valutazione del rischio costituisce, a nostro avviso, da una parte, un mezzo facilmente intelligibile per il cittadino quando voglia controllare la contaminazione riguardante il radon e le onde elettromagnetiche presenti all'interno della sua casa.

Dall'altra parte, invece, rappresenta uno strumento semplice ed efficace nelle mani sia del Tecnico pro-gettista che del Legislatore quando si attuino program-mi seri e credibili di tutela della salute pubblica da codesti agenti fisici altamente nocivi.

In definitiva, il lavoro evidenzia un tentativo di de-lineare una procedura scientifica quantitativa per la determinazione dell'impatto ambientale indoor da ra-diazioni ionizzanti e non.- Essa consta di tre momenti distinti e separati di operatività.

Il primo, di natura conoscitiva ed analitico, preve-de l'acquisizione, nell'accezione più ampia, di tutti i dati tecnici, progettuali, strutturali ed ambientali del caso.

Il secondo, di natura quantitativa, riguarda la determinazione del rischio, con la sopra indicata formula, per esposizione al radon ed alle onde elettromagneti-che nell'ambiente confinato in esame.-

Il terzo, di natura pragmatica, è connesso con la decisione amministrativa che si intende prendere per la specifica problematica di contaminazione ambien-tale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. G. Nicoletti, C. Marandola, F. Anile, An index for Air Quality in Closed Environments, 7th Renewable World Congress Clima 2000, Naples, Italy, September 2001.
2. F. Potenza et al., "Radon Pollution's Dynamics in Indoor Environments: Proposal about the Control", 3rd International Conference Health Building, Budapest, 1994.
3. Editoriale, "Inquinamento da campi elettromagnetici", Ingegneria Ambientale, 2001, marzo-aprile, Milano, Italia.
4. G. Saccomanno et. al., "Relationship of Radioactive Radon Daughters and Cigarette Smoking in the Genesis of Lung Cancer in Uranium Miners", Cancer, vol. 68, 1988.
5. L. Romanacci e G. Mingati, "Inquinamento Elettromagnetico", Edizione 2001, Napoli, Italia.
6. G. D'Inzeo, "Interazione tra campi elettromagnetici e sistemi biologici", Rivista Ambiente e Sicurezza N. 3, Il Sole24Ore, 2001.
7. M. Palmisano, G. Ravegnon, "Rischio Radon. Il pericolo viene dal basso.", Rivista Acqua-Aria, n. 7, 2000.
8. P. Vecchia, "Il Contributo delle sorgenti domestiche nell'inquinamento elettromagnetico", Rivista Ambiente e Sicurezza N. 3, Il Sole24Ore, 2001.

ANALISI E CONFRONTO DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO TRA IL CENTRO URBANO DI ROMA E UN COMUNE DELLA PRIMA CORONA DELL'AREA METROPOLITANA

Daniela Persiani[1], Patrizia Prignani[2]

[1]Capitale Lavoro S.p.A. Società Unipersonale della Provincia di Roma, [2]Provincia di Roma, Dipartimento IV "*Servizi di Tutela Ambientale*", Servizio 3 "*Tutela Aria ed Energia*", via Tiburtina 691, 00159 Roma

SOMMARIO

Il Servizio Tutela Aria ed Energia della Provincia di Roma (Dip. IV, Serv. 3) svolge un'attività di monitoraggio e di studio dell'inquinamento atmosferico nel territorio provinciale presso aree di specifico interesse ambientale. Nell'ambito di queste attività, è stato intrapreso nel 2007 uno studio della qualità dell'aria nel settore nord-est della Provincia di Roma, presso i Comuni di Mentana e Monterotondo, territori non coperti dalla rete regionale di monitoraggio gestita da Arpa Lazio e risultati particolarmente interessanti in quanto caratterizzati, negli ultimi decenni, da un rilevante aumento demografico e un forte pendolarismo verso Roma. Il quadro di analisi è stato completato nel corso degli anni 2008-2009 con una campagna di monitoraggio nel Comune di Fonte Nuova.

Nella presente nota viene focalizzata l'attenzione sui siti monitorati in prossimità della via Nomentana, una strada ad alta densità di traffico che collega Fonte Nuova direttamente con Roma. L'analisi è stata effettuata confrontando i dati misurati con i limiti di legge e studiando gli andamenti, sia in relazione alle condizione meteorologiche e ai flussi emissivi delle principali sorgenti di inquinamento presenti nelle aree esaminate, sia confrontandoli con quelli registrati negli stessi periodi dalle centraline di monitoraggio Arpa Lazio nel Comune di Roma.

PREMESSA

In attuazione dell'articolo 6 del D. Lgs. 351/99 [1], la Regione Lazio, con D.G.R. 767/03 [2], ha classificato il proprio territorio in zone omogenee sotto il profilo della qualità dell'aria col duplice scopo di pianificare gli interventi da adottare nelle zone critiche, affinché i livelli degli inquinanti rientrino nei valori limiti e nei termini stabiliti dal D.M. 60/02 [3], e di preservare la migliore qualità dell'aria nelle zone dove non sussistono rischi di superamenti. Sono state individuate cinque classi per gli inquinanti descritti dal D.M. 60/02 (CO, NO_2, SO_2, PM_{10}, Pb e benzene), utilizzando i valori limite, i margini di valutazione superiore e inferiore e i margini di tolleranza dei vari inquinanti. Sulla base di un'analisi statistica, il territorio laziale è stato quindi suddiviso in quattro classi con livello di criticità decrescente:

- Classe 1: comuni ad alta criticità nei quali i valori degli inquinanti sono superiori ai limiti previsti aumentati del margine di tolleranza ed è obbligatorio predisporre dei piani di azione;
- Classe 2: comuni nei quali i valori degli inquinanti sono superiori ai limiti previsti ed è obbligatorio predisporre dei piani di azione;
- Classe 3: comuni nei quali i valori degli inquinanti sono compresi tra i margini superiori di valutazione e i limiti previsti dalla normativa ed è obbligatorio effettuare il monitoraggio;
- Classe 4: comuni nei quali i valori degli inquinanti sono più bassi della soglia di valutazione inferiore.

Nella Figura 1 è riportata la classificazione per i Comuni della Provincia di Roma.

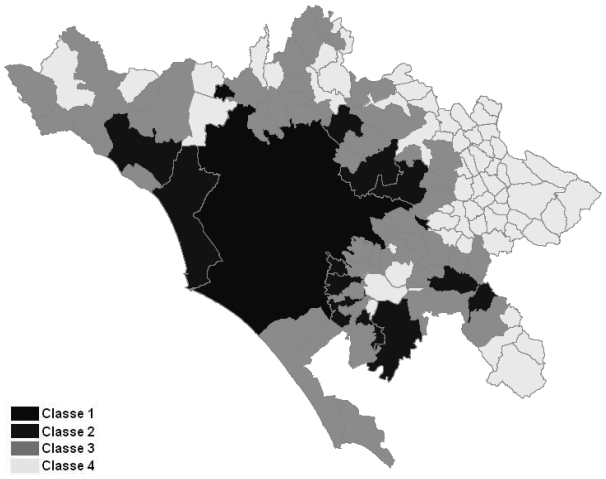


Figura 1: Classificazione del territorio provinciale secondo il D.G.R. 767/03.

L'Ufficio Monitoraggi della Provincia di Roma nel 2007 ha intrapreso uno studio della qualità dell'aria nei Comuni di Mentana e Monterotondo, zone che sono state caratterizzate negli ultimi decenni da un rilevante aumento demografico e un forte pendolarismo verso Roma.

L'analisi effettuata ha evidenziato per il Comune di Monterotondo un sostanziale accordo con la classificazione del territorio regionale (secondo il D.G.R. 767/03 Monterotondo appartiene alla classe dei comuni che devono predisporre dei piani di azione finalizzati al risanamento della qualità dell'aria). [4] Nel caso del Comune di Mentana, appartenente invece alla classe 3, durante il monitoraggio, sono state riscontrate delle situazioni locali critiche in cui, a causa di specifiche condizioni (la presenza di un'arteria

stradale ad alta densità di traffico, la via Nomentana), è risultato opportuno valutare azioni circoscritte di risanamento e prevenzione. [5]

Per completare il quadro d'analisi del settore nord-est della Provincia di Roma, prima corona dell'area metropolitana, l'Ufficio Monitoraggi ha condotto nel corso degli anni 2008–2009 una campagna di monitoraggio nel Comune di Fonte Nuova che è stato classificato nel D.G.R. 767/03 in classe 3.

CARATTERIZZAZIONE TERRITORIALE

Il Comune di Fonte Nuova è nato il 15 ottobre 2001 per distacco di alcune frazioni dal Comune di Mentana e di Guidonia Montecelio; la sua superficie territoriale, prevalentemente collinare secondo la definizione delle zone altimetriche dell'ISTAT, è pari a 20,15 km^2 (fonte ISTAT del 2004).

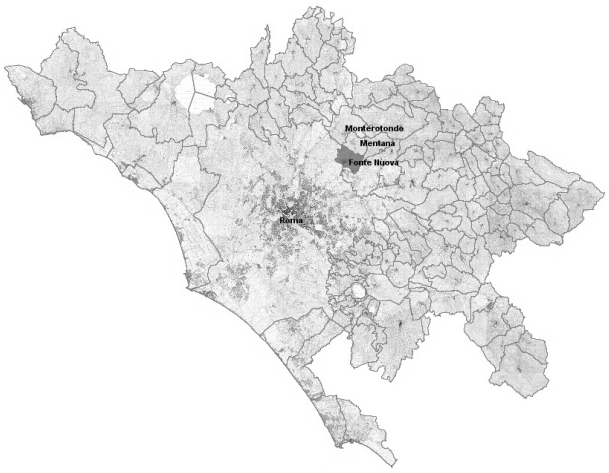


Figura 2: Localizzazione del Comune di Fonte Nuova nel territorio provinciale.

La dinamica demografica del Comune di Fonte Nuova, nel periodo 2002-2009, riportata nella Figura 3, evidenzia un costante incremento della popolazione residente, la cui variazione (periodo 2002-2009) si attesta al 21%. A titolo di confronto nelle tabelle e nelle figure seguenti sono stati riportati anche i dati degli altri Comuni monitorati del settore nord – est della Provincia di Roma, Mentana e Monterotondo.

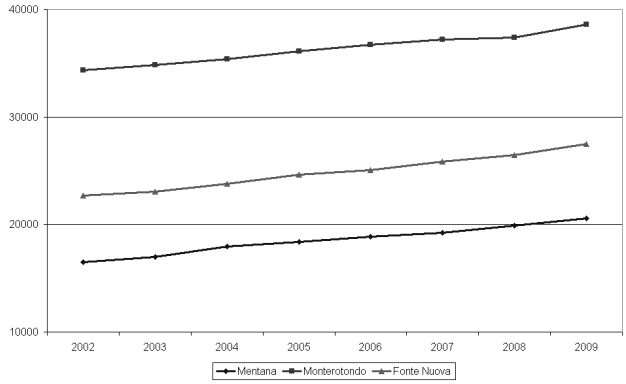


Figura 3: Evoluzione demografica del Comune di Fonte Nuova, popolazione residente al 1° gennaio, periodo 2002-2009. (fonte ISTAT)

Nella Tabella 1 sono riportati gli spostamenti della popolazione entro e fuori dal Comune nell'anno 2001; i dati vengono confrontati anche con quelli del Comune di Roma e dell'intero territorio provinciale. Risulta che la percentuale dei movimenti a Fonte Nuova risulta essere analoga a quella del Comune di Roma e della stessa Provincia.

Tabella 1: Popolazione residente che si sposta giornalmente, anno 2001. (fonte ISTAT)

Comune	Luogo di destinazione		% dei movimenti rispetto alla popolazione
	nello stesso Comune di dimora	fuori dal Comune	
Fonte Nuova	4617	6560	49,3%
Mentana	3674	4440	49,8%
Monterotondo	9566	7841	50,6%
Roma	1228538	46309	50,1%
Provincia RM	1511143	318696	49,4%

Nella figura seguente è riportato il grafico relativo alle varie tipologie dei veicoli utilizzati nell'anno 2008 nel Comune di Fonte Nuova. Si nota la netta prevalenza delle autovetture (77%), seguita dai motocicli (15%) e dagli autocarri (6%); i valori sono simili a quelli registrati nei Comuni di Mentana e Monterotondo e per l'intera Regione Lazio.

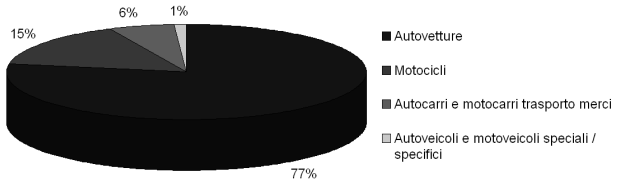


Figura 4: Parco veicolare del Comune di Fonte Nuova, anno 2008. (fonte ACI)

Infine nella Figura 5 è riportata la suddivisione delle autovetture per categoria; emerge per il Comune di Fonte Nuova la predominanza degli Euro 4, in tendenza con i valori della Provincia di Roma.

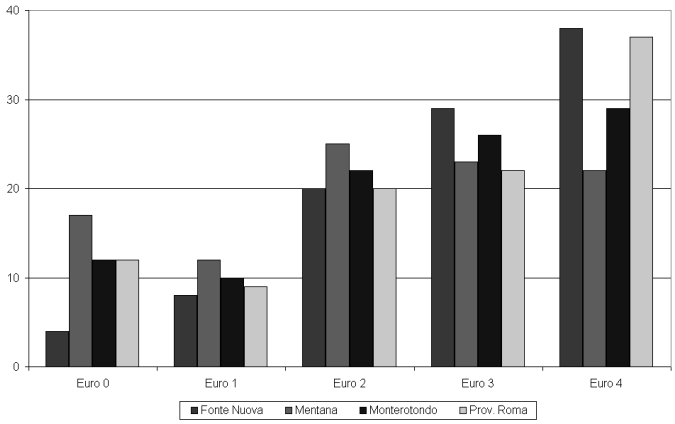


Figura 5: Percentuale autovetture distinte per categoria, anno 2008. (fonte ACI)

MONITORAGGIO ATMOSFERICO

La campagna di monitoraggio presso il Comune di Fonte Nuova è stata condotta impiegando i due laboratori mobili a disposizione dell'Ufficio Monitoraggi della Provincia di Roma in diversi siti del territorio comunale. Tali siti sono stati individuati sulla base dei criteri del D.M. 60/02, in accordo con le autorità comunali. Per valutare i fenomeni di inquinamento in funzione delle diverse condizioni meteorologiche, la campagna di monitoraggio è stata programmata in modo da poter osservare le aree in un periodo autunnale/invernale e primaverile. I periodi e i siti monitorati sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2: Calendario della campagna di monitoraggio nel Comune di Fonte Nuova.

Postazione	Laboratorio	Periodo di monitoraggio
Piazza delle Rose		30/09–15/12/2008
		02/04-27/05/2009
Piazza Pio		06/10-18/12/2008 (tranne 13-17/11/2008)
		28/04-18/06/2009
Piazza Nassiriya		12/01-10/02/2009
Scuola A. Moro		10/02-28/04/2009

Tutti i siti monitorati si trovano in aree urbanizzate del Comune: mentre i siti di Piazza Pio e della scuola A. Moro si trovano in prossimità di una strada ad alta densità di traffico su cui transitano anche mezzi pesanti (Via Nomentana), il sito di Piazza delle Rose si trova in prossimità della via Palombarese. E' stata monitorata per un breve periodo anche Piazza Nassiriya che si trova sempre lungo la via Nomentana. Nella Figura 6 è riportata la localizzazione dei siti di monitoraggio nel Comune di Fonte Nuova.



Figura 6: Ubicazione dei siti monitorati nel Comune di Fonte Nuova. Sono evidenziate in giallo la via Nomentana e la via Palombarese. (fonte Google Earth)

Il laboratorio utilizzato per il monitoraggio dei siti lungo la via Nomentana dispone degli analizzatori per la misura in continuo degli inquinanti $NO_x/NO/NO_2$, BTX (Benzene, Toluene, Xileni, Etilbenzene), PM_{10} e $PM_{2,5}$ e di una stazione meteo climatica. [6]

Si riportano di seguito, per ogni sito monitorato, le tabelle sintetiche con l'indicazione dei valori massimi, minimi, medi e degli eventuali superamenti del limite di legge, riscontrati nei periodi di misura per gli inquinanti normati dal D.M. 60/02.
I limiti di legge e i relativi margini di tolleranza sono riepilogati nella Tabella 3.

Tabella 3: Valori limite (VL) e margini di tolleranza (MDT) degli inquinanti monitorati normati nel D.M. 60/02.

($\mu g/m^3$)		INQUINANTE				
		NO_2		Benzene	PM_{10}	
Periodo di mediazione		1 ora	anno civile	anno civile	24 ore	anno civile
Valore limite VL		200	40	5	50	40
MDT	2008	20	44	7	--	--
	2009	10	42	6	--	--
N° superamenti consentiti per anno civile		18	--	--	35	--

Tabella 4: Valori massimi, minimi, medi e numero dei superamenti del valore limite orario (VL_o) per NO_2 misurati nei siti monitorati lungo la via Nomentana, Comune di Fonte Nuova.

NO_2 ($\mu g/m^3$)				
	P.za Pio		P.za Nassiriya	Scuola A. Moro
	07/10-17/12/08	29/04-17/06/09	14/01-09/02/09	11/02-27/04/09
Massimo orario	153	145	152	157
Minimo orario	2	4	4	4
Media	46	44	46	42
Superamenti VL_o	**0**	**0**	**0**	**0**

Tabella 5: Valori massimi, minimi, medi per Benzene misurati nei siti monitorati lungo la via Nomentana, Comune di Fonte Nuova. I superamenti del VL non sono riportati in quanto trattasi di limite annuale.

BENZENE ($\mu g/m^3$)				
	P.za Pio		P.za Nassiriya	Scuola A. Moro
	07/10-17/12/08	29/04-17/06/09	14/01-09/02/09	11/02-27/04/09
Massimo orario	15,9	5,9	11,1	7,1
Minimo orario	0,1	0,3	0,2	0,2
Media	1,8	1,4	2,4	1,4

Tabella 6: Valori massimi, minimi, medi e numero dei superamenti del valore limite giornaliero (VL_g) per PM_{10} misurati nei siti monitorati lungo la via Nomentana, Comune di Fonte Nuova.

PM_{10} ($\mu g/m^3$)				
	P.za Pio		P.za Nassiriya	Scuola A. Moro
	07/10-17/12/08	29/04-17/06/09	14/01-09/02/09	11/02-27/04/09
Massimo giornaliero	80	69	177	79
Minimo giornaliero	19	15	28	11
Media	44	38	47	36
Superamenti VL_g	**19**	**8**	**7**	**12**

Da quanto riportato nelle tabelle di sintesi emerge in maniera evidente che l'inquinante più critico risulta essere il PM_{10}. Considerando che i siti di Piazza Pio, Piazza Nassiriya e della Scuola A. Moro si trovano lungo la via Nomentana a poca distanza l'uno rispetto l'altro e che durante l'anno 2009 sono stati registrati, durante il monitoraggio, 27 superamenti complessivi, si può ipotizzare, come linea di tendenza nel corso dell'anno, un numero di superamenti maggiore della soglia di 35 prevista dalla normativa. E' da notare infine che il valore massimo registrato a Piazza Nassiriya di 177 $\mu g/m^3$ non è un caso isolato dovuto a fenomeni di carattere locale: in tutta la Provincia di Roma infatti, a causa delle condizioni meteorologiche particolarmente sfavorevoli, sono stati registrati nello stesso giorno valori elevati del PM_{10} (ad esempio 158 $\mu g/m^3$ nelle centraline Arpa Lazio di Arenula e Ciampino).

CONFRONTO CON I DATI DELLE CENTRALINE ARPA LAZIO NEL COMUNE DI ROMA

La rete di monitoraggio della qualità dell'aria gestita da Arpa Lazio è attualmente costituita da 34 stazioni, distribuite sull'intero territorio regionale, suddivise in:

- 2 centraline nella Provincia di Viterbo e Rieti;
- 4 centraline nella Provincia di Latina;
- 7 centraline nella Provincia di Frosinone;
- 19 centraline nella Provincia di Roma (12 delle quali nel Comune di Roma)

La strumentazione disponibile nelle centraline Arpa Lazio nel Comune di Roma è riportata nella Tabella 7.

I dati registrati nelle centraline Arpa Lazio del Comune di Roma sono stati confrontati con quelli registrati nei siti monitorati nel Comune di Fonte Nuova.

Si riporta lo studio effettuato per il sito di Piazza Pio relativamente agli inquinanti normati Benzene, NO_2 e PM_{10}.
Nella Figura 7 è riportato il grafico relativo al valore medio del Benzene calcolato per Piazza Pio e per le centraline Arpa Lazio nel Comune di Roma dotate di analizzatore BTX, mentre nella Figura 8 è riportato il grafico relativo al valore medio dell'NO_2.

Tabella 7: Elenco strumentazione disponibile nelle centraline Arpa Lazio ubicate nel Comune di Roma.

STAZIONE	STRUMENTAZIONE	TIPO
Ada	CO - NO_X - SO_2 - O_3 - BTX - PM_{10} - $PM_{2,5}$	Fondo Urbano
Arenula	NO_X - PM_{10} - $PM_{2,5}$	Residenziale – ZTL
Bufalotta	NO_X - SO_2 - O_3 - BTX - PM_{10}	Fondo Urbano Residenziale
Castel di Guido	NO_X - O_3	Fondo Rurale
Tenuta del Cavaliere	NO_X - O_3	Fondo Urbano / Suburbano
Cinecittà	NO_X - CO - O_3 - BTX - PM_{10}	Fondo Residenziale
Cipro	CO - NO_X - O_3 - PM_{10} - $PM_{2,5}$	Fondo Urbano Residenziale
Fermi	PM_{10} - CO - NO_X - BTX	Traffico
Francia	CO - NO_X - BTX - PM_{10} - $PM_{2,5}$	Traffico
Magna Grecia	CO - NO_X - BTX - PM_{10}	Traffico
Preneste	NO_X - O_3 - BTX - PM_{10}	Fondo Urbano Residenziale
Tiburtina	NO_X - CO - BTX - PM_{10}	Traffico

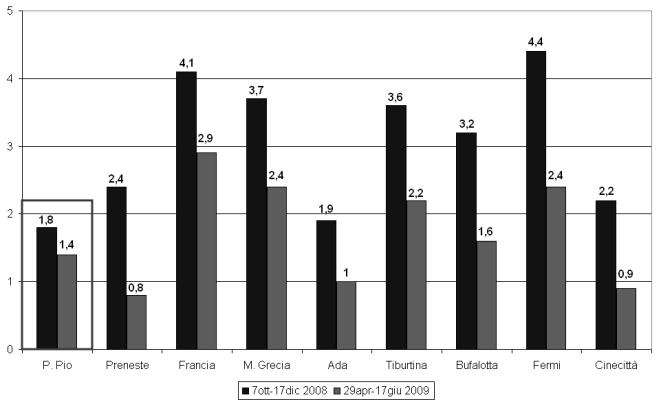


Figura 7: Media del Benzene ($\mu g/m^3$) calcolata per le centraline Arpa Lazio nel Comune di Roma e per Piazza Pio, periodi 7ott-17dic08 e 29apr-17giu09.

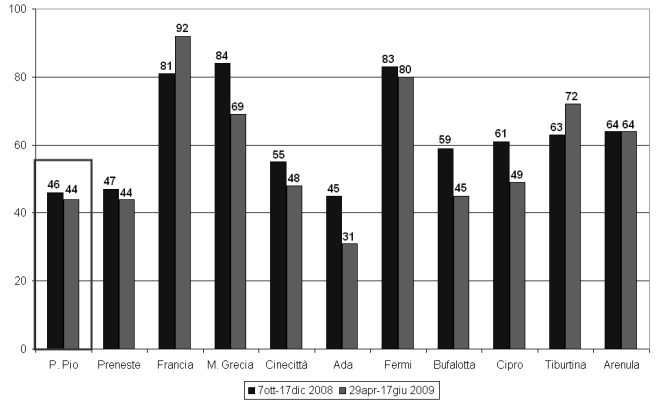


Figura 8: Media del NO_2 ($\mu g/m^3$) calcolata per le centraline Arpa Lazio nel Comune di Roma e per Piazza Pio, periodi 7ott-17dic08 e 29apr-17giu09.

La concentrazione media calcolata per il Benzene e l'NO_2 di Piazza Pio risulta essere analoga ai valori medi registrati nella centralina Ada di Fondo Urbano e nelle centraline di Fondo Residenziale (in particolare nel periodo primaverile).

Una situazione più critica è stata riscontrata nel caso del PM_{10}. Nelle figure seguenti sono riportati i dati significativi (valore medio e numero di superamenti del valore limite giornaliero pari a 50 $\mu g/m^3$) del PM_{10} registrati a Piazza Pio del Comune di Fonte Nuova e nelle centraline Arpa Lazio nel Comune di Roma.

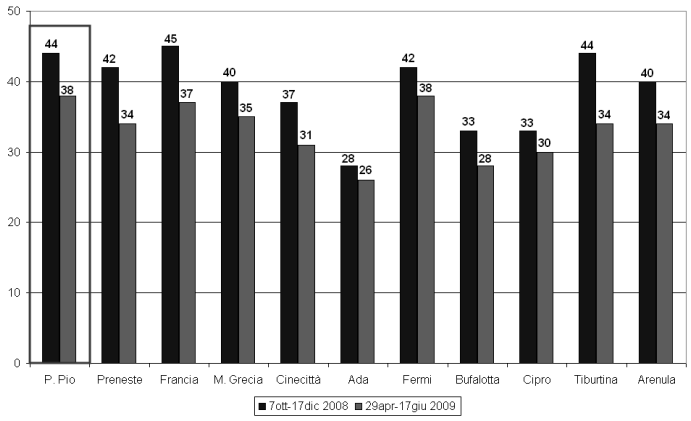


Figura 9: Media del PM_{10} ($\mu g/m^3$) calcolata per le centraline Arpa Lazio nel Comune di Roma e per Piazza Pio, periodi 7ott-17dic08 e 29apr-17giu09.

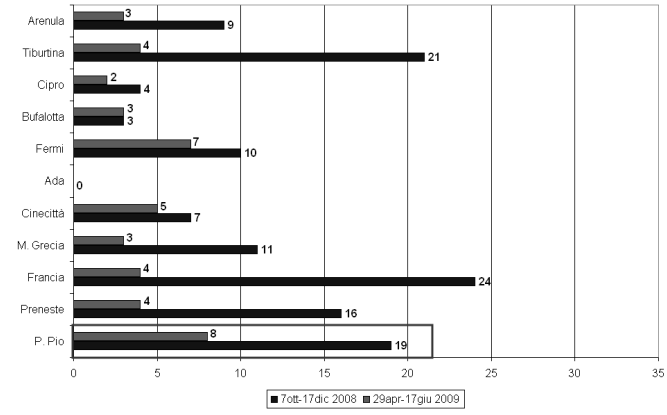


Figura 10: N° superamenti del valore limite giornaliero del PM_{10} ($\mu g/m^3$) registrati nelle centraline Arpa Lazio nel Comune di Roma e per Piazza Pio, periodi 7ott-17dic08 e 29apr-17giu09.

Il quadro che emerge dall'analisi delle Figure 9 e 10 evidenzia una forte analogia del sito di P.za Pio con le centraline Arpa Lazio da Traffico più critiche (Tiburtina, Fermi e Francia) sia nel valore medio che nel numero di superamenti del valore limite giornaliero.

Nella Figura 11 sono riportati gli andamenti giornalieri del PM_{10}: sono state scelte una centralina Arpa Lazio di riferimento per ogni tipologia di stazione di monitoraggio (Fermi per le centraline da Traffico, Cipro per le centraline da Fondo Residenziale e Ada centralina di Fondo Urbano). I grafici mostrano andamenti simili, ma i valori registrati a Piazza Pio e a Fermi sono mediamente superiori a quelli registrati nelle centraline Cipro e Ada.

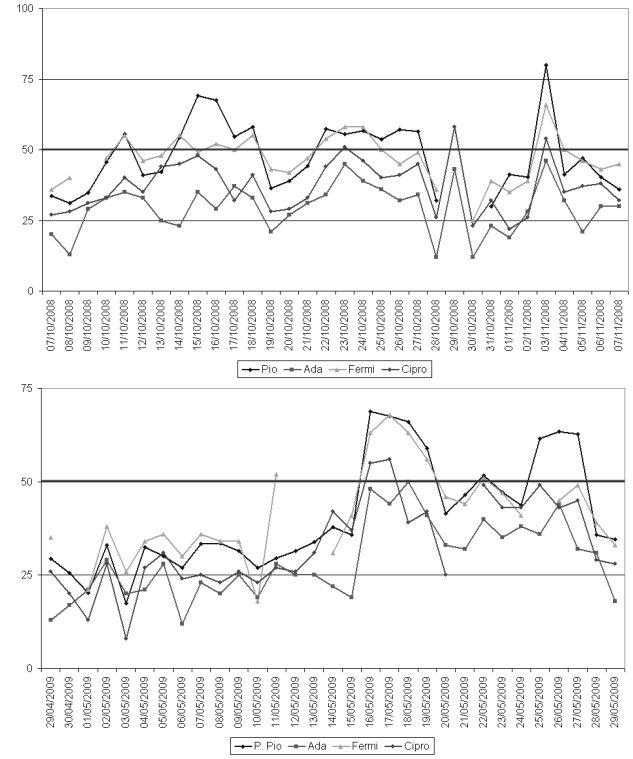


Figura 11: Andamenti giornalieri del PM_{10} per Piazza Pio e per le centraline Arpa Lazio Fermi, Cipro e Ada del Comune di Roma, periodi 7ott-7nov08 e 29apr-29mag09.

Sebbene gli andamenti orari del Benzene e dell'NO/NO_2 registrati presso il sito di P.za Pio sulla via Nomentana presentino i tipici picchi dovuti al traffico del primo mattino e del tardo pomeriggio, le concentrazioni misurate risultano più basse rispetto a quelle rilevate dalle centraline Arpa Lazio da Traffico presumibilmente perché, per quanto riguarda la sorgente traffico, non è paragonabile il flusso di veicoli circolante sulla via Nomentana, strada ad una corsia per senso di marcia, con quello transitante nelle strade dove sono ubicate le centraline Arpa Lazio da Traffico nel Comune di Roma (strade a 4 corsie per senso di marcia). A titolo di esempio nella Tabella 8 sono riportati i dati del traffico registrati sulla via Nomentana (altezza km 15,35) e a Corso Francia (dove è ubicata la centralina da Traffico Francia) e a Viale Marconi (dove è ubicata la centralina da Traffico Fermi) durante la settimana 17-23 novembre 2008. I veicoli transitanti sono stati suddivisi in 3 categorie sulla base della lunghezza: la classe 1 comprende i veicoli civili la cui lunghezza è compresa tra 0-6 metri, la classe 2 i veicoli trasporto leggero lunghi 6-12 metri e la classe 3 i veicoli trasporto pesante di lunghezza maggiore di 12 metri.

Più delicata risulta essere la situazione del PM_{10}: la concentrazione del PM_{10} nell'aria è strettamente connessa non solo alle sorgenti, ma anche alle condizioni meteo-climatiche e alla geografia del sito che può favorirne l'accumulo (si pensi ad esempio al caso limite della centralina Arpa Lazio di Frosinone Scalo che, sebbene non sia una centralina prettamente da Traffico, anche a causa della sua collocazione geografica, misura il più elevato numero di superamenti del PM_{10} in tutta la Regione Lazio [7]). Uno studio più approfondito sull'orografia dei siti monitorati lungo la via Nomentana potrebbe interpretare con maggior dettaglio i superamenti registrati del valore limite giornaliero del PM_{10}.

Tabella 8: Dati del traffico registrati a Corso Francia (centralina Francia), Viale Marconi (centralina Fermi), entrambe strade a 4 corsie nella direzione per Roma e sulla Via Nomentana (1 corsia direzione per Fonte Nuova) durante la settimana 17-23 novembre 2008.

	Francia (4 corsie)	**Fermi (4 corsie)**	**Nomentana (1 corsia)**	
classe 1	37049	20905	15698	17/11/2008
classe 2	1108	4435	767	
classe 3	332	909	179	
classe 1	34502	21647	15895	18/11/2008
classe 2	1195	4547	857	
classe 3	381	943	171	
classe 1	33595	22064	16141	19/11/2008
classe 2	1202	4924	817	
classe 3	410	908	171	
classe 1	36999	21646	15938	20/11/2008
classe 2	1288	4677	822	
classe 3	372	1017	170	
classe 1	38959	22348	16227	21/11/2008
classe 2	1003	4980	819	
classe 3	350	880	159	
classe 1	35368	21609	16133	22/11/2008
classe 2	772	3642	639	
classe 3	282	661	155	
classe 1	30538	19087	15344	23/11/2008
classe 2	380	2655	215	
classe 3	163	438	69	

CONCLUSIONI

Il D. Lgs. n. 267/00 [8] definisce area metropolitana la zona comprendente il Comune capoluogo di Roma e gli altri Comuni uniti a Roma da continuità territoriale e da rapporti di stretta integrazione in ordine all'attività economica, ai servizi essenziali, ai caratteri ambientali, alle relazioni sociali e culturali (Art. 22-23). L'analisi effettuata ben evidenzia la stretta correlazione che sussiste tra il Comune di Roma e quello di Fonte Nuova che appartiene alla prima corona dell'area metropolitana di Roma: gli andamenti registrati del PM_{10} sono i medesimi e la via Nomentana, strada consolare che collega direttamente Fonte Nuova con Roma, anche per motivi orografici, presenta, sempre in termini di PM_{10}, le stesse criticità delle centraline da traffico romane ubicate nelle strade cittadine più frequentate (Corso Francia, Via Tiburtina, Viale Marconi).

Pertanto la definizione di area metropolitana è di fondamentale importanza anche nell'analisi di diffusione dell'inquinamento atmosferico: provvedimenti riguardanti il risanamento della qualità dell'aria limitati al solo Comune di Roma potrebbero non essere sufficienti in quanto le strade consolari, soggette a forte pendolarismo, sono oramai parte integrante del tessuto urbano della città, come dimostrato dai superamenti e dagli andamenti del PM_{10} registrati nei siti in prossimità della via Nomentana a Fonte Nuova e a Mentana. [5,6]

La Provincia e ancora meglio la Città Metropolitana, enti sovra-comunali, potrebbero occupare un ruolo privilegiato in materia di risanamento ambientale, se fossero dotate di tutti i mezzi necessari (normativi e regolamentari).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. D. Lgs. n. 351 del 4 agosto 1999 "Attuazione della direttiva 96/62/CE in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria ambiente".
2. D.G.R. n. 767 del 1° agosto 2003 "D.Lgs. 351/99, attuazione dell'art. 5 e dell'art. 6. Valutazione preliminare della qualità dell'aria ed individuazione, in prima applicazione, delle zone del territorio regionale di cui agli artt. 7, 8 e 9 del suddetto decreto".
3. D.M. n. 60 del 2 aprile 2002 "Recepimento della direttiva 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo e della direttiva 2000/69/CE relativa ai valori limite di qualità aria ambiente per il benzene e il monossido di carbonio".
4. V. Leonardi, D. Persiani, P. Prignani, A. Venditti, "Valutazione della qualità dell'aria nel Comune di Monterotondo", Roma, luglio 2008.
5. P. Prignani, D. Persiani, A. Venditti, V. Leonardi, "Valutazione della qualità dell'aria nel Comune di Mentana", Roma, luglio 2008.
6. P. Prignani, D. Persiani, V. Leonardi, A. Rossini, D. Dina , "Valutazione della qualità dell'aria nel Comune di Fonte Nuova", Roma, agosto 2009.
7. Ad esempio se si considera il numero di superamenti del valore limite giornaliero del PM_{10} registrati nel corso dell'anno 2009 nelle varie Province della Regione Lazio, a Frosinone Scalo sono stati registrati 122 superamenti contro i 67 di Francia e Colleferro11 (Provincia di Roma), i 10 della centralina Rieti1, i 16 di Civita Castellana (Viterbo) e i 26 della centralina LT-Tasso (Latina).
8. D. Lgs. n. 267 del 18 agosto 2000 "Testo unico delle leggi sull'ordinamento degli enti locali".

SCENARI DI QUALITÀ DELL'ARIA PER L'UMBRIA E IL CENTRO ITALIA: L'APPLICAZIONE DEL MODELLO DI DISPERSIONE CHIMICO-FISICO CHIMERE

M. Angelucci[1], M. Vecchiocattivi[1], S. Crocchianti[2], F.Pianigiani[3]
[1]ARPA Umbria - email: m.vecchiocattivi@arpa.umbria.it
[2]Dip. Chimica Università di Perugia, [3]DICA Università di Perugia

SOMMARIO

Il modello Chimere è una suite di codici che, con un approccio euleriano su griglia, permette di simulare gran parte dei fenomeni chimico-fisici subiti dagli inquinanti presenti in atmosfera. Nell'articolo viene descritta l'implementazione fatta in ARPA Umbria di questo modello, la valutazione della performance e la sua applicazione per la valutazione degli scenari di qualità dell'aria. Utilizzando diversi input emissivi, sono state realizzate simulazioni per la valutazione di vari scenari tra cui l'anno base, riferito al 2004, e varie proiezioni per gli anni successivi fino al 2020.

INTRODUZIONE

La tutela dell'ambiente nel suo complesso, e in particolare la conoscenza del livello di qualità dell'aria ambiente, sono argomenti che coinvolgono sempre più l'opinione pubblica, le autorità competenti e gli operatori industriali. La corretta gestione di tali problemi richiede la predisposizione di adeguati strumenti di intervento in diversi settori e, quindi, la generazione di una specifica normativa tecnica in merito.

La normativa nazionale e la recente normativa internazione, ovvero la Direttiva 2008/50/CE relativa alla valutazione della qualità dell'aria, individuano le valutazioni modellistiche come uno degli strumenti da adottare insieme alle misurazioni in siti fissi; questo anche per avere strumenti per stimare la distribuzione geografica della concentrazione e per costituire una base per il calcolo dell'esposizione collettiva della popolazione nella zona interessata.

Per questo, ARPA Umbria e il laboratorio di ricerca "Computational Dynamics and Kinetics" del Dipartimento di Chimica dell'Università di Perugia, hanno implementato una catena modellistica basata su Chimere, ovvero un modello euleriano a griglia in grado di simulare il trasporto, la dispersione, le trasformazioni chimiche e la deposizione (secca e umida) di inquinanti aeriformi ed aerosol. La catena si interfaccia con i dati dell'Inventario Regionale e l'Inventario Nazionale delle Emissioni, gestiti rispettivamente da ARPA Umbria e dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), con i dati meteorologici provenienti dal modello nazionale LAMI, gestito dall'ARPA Emilia Romagna, e con i dati di condizioni al contorno provenienti dal sistema Prev'Air a scala continentale gestito dell'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS).

Nell'articolo, dopo una breve descrizione della catena modellistica, saranno presentati i risultati relativi all'analisi delle performance della stessa e quelli relativi alla simulazione di uno scenario base, di scenari relativi agli anni 2010 e 2020 e del caso limite denominato zero-out nel quale sono state "spente" tutte le emissioni antropogeniche dell'Umbria.

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO

Il modello Chimere [1] è una complessa suite di codici che vengono lanciati in una determinata sequenza con il compito di eseguire varie pre-elaborazioni su ciascuno dato di input (meteo, emissivo, condizioni al contorno, dominio) e di risolvere le equazioni di diffusione e trasformazione chimico-fisica per fornire, come output, le concentrazioni in aria. Il modello è nato dalla collaborazione di vari istituti di ricerca francesi, l'Institut Pierre-Simon Laplace e LISA, entrambi facenti parte del CNRS, e dall'INERIS; è un software open source distribuito con licenza GNU/GPL e, come tale, è aperto alla collaborazione e ai contributi di tutta la comunità internazionale di utilizzatori e sviluppatori dello stesso.

La versione adottata è la V200606A: questa, scritta in fortran 90, è stata implementata per funzionare in un ambiente di calcolo parallelo basato sullo standard MPI-1, come quello fornito dalle librerie LAM/MPI o MPICH1.

Nella figura 1 è mostrato uno schema a blocchi del funzionamento dei vari codici che fanno parte della suite di calcolo insieme ai dati che sono trattati; tali codici hanno il compito di interfacciare tutti i dati di input (ovvero, i due dataset 3+1D con i dati meteorologici e con le condizioni al contorno e quello 2+1D con i dati emissivi) dal loro formato originario a quello richiesto dal modello, far girare il nucleo principale di calcolo e processare il dataset 3+1D con le concentrazioni in output per elaborare alcuni indici descrittivi tra cui quelli richiesti dalla normativa per la qualità dell'aria.

Nella fase di implementazione della catena, tutti questi codici di interfaccia sono stati rivisti, adattati e, in alcuni casi, profondamente modificati al fine di rendere possibile l'esecuzione del modello a partire dai dati di input in nostro possesso. Inoltre, il pre-processore delle emissioni è in realtà anch'esso una serie di codici che, oltre a elaborare i dati dell'Inventario Regionale delle Emissioni, permette anche di creare scenari emissivi nel quale tali emissioni sono state fatte variare.

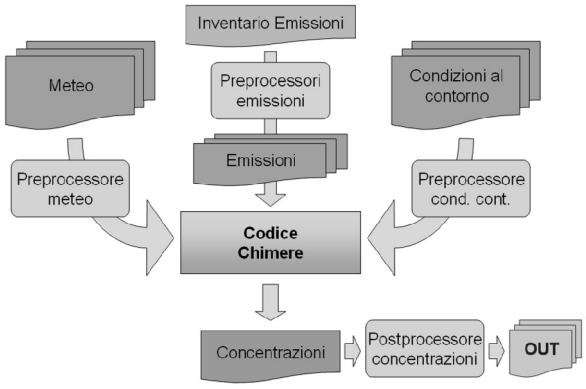


Figura 1: Schema a blocchi del funzionamento di Chimere

Tutta la suite è stata installata e testata in ambienti estremamente diversi sia come hardware che come compilatore e librerie utilizzate:

a) Sun Station: cluster di 2 nodi biprocessori UltraSPARC-IIIi (RISC), sistema operativo Sun Solaris 9, compilatore Fortran Sun Studio 11 e ambiente parallelo Sun HPC5.0;

b) cluster Linux (Dip. Mat.): 8 nodi con Intel Xeon 3 GHz, sistema operativo basato su RedHat 8.0, compilatore Intel Ifort 3.1.036, ambiente parallelo MPICH1;

c) cluster Linux (ARPA): 8 nodi + 1 con Inter Xeon 3 GHz, sistema operativo Ubuntu Server 8.04 a 64bit, compilatore G95 0.91, ambiente parallelo LAM-MPI.

La piattaforma usata per elaborare lo scenario descritto nei capitoli seguenti è la c) e risiede in ARPA Umbria.

Il dominio di calcolo utilizzato è un'area di 400x500 km ed è composto da 80x100 celle da 5x5 km con 8 livelli verticali che arrivano ad una pressione di 500 mbar. Nella figura 2 è riportata l'estensione orizzontale di tale dominio.

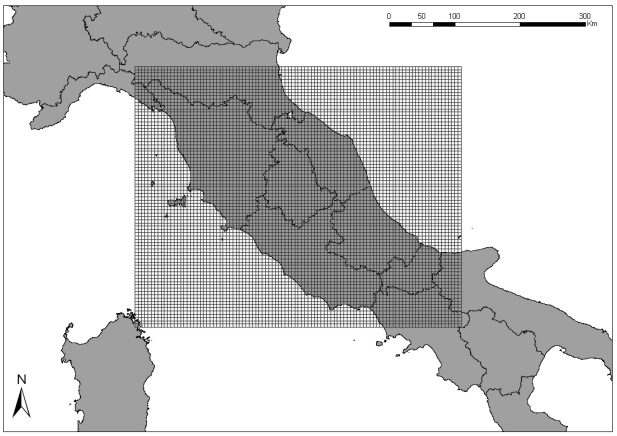


Figura 2: Estensione orizzontale delle celle del dominio di calcolo

Con tale dominio, il tempo richiesto per una simulazione della durata di un anno, può variare da 4 a 7 giorni a seconda delle impostazioni scelte per il calcolo.

Sono state realizzate diverse simulazioni relativi a vari scenari:

a) Scenario base: è lo scenario di riferimento basato sui dati emissivi, meteo e di condizioni al contorno per l'anno 2004 con l'eccezione dei dati emissivi esterni dall'Umbria per i quali si aveva a disposizione l'anno 2003 dell'Inventario Nazionale.

b) Scenario CLE2010: è uno scenario realizzato a partire dagli stessi dati meteo e di condizioni al contorno dello scenario base ma con i dati emissivi scalati secondo lo scenario emissivo nazionale [2]; serve per vedere gli effetti delle riduzioni delle emissioni già previsti dalla legislazione vigente (CLE = Common LEgislation).

c) Scenario CLE2020: è l'analogo del precedente scenario ma proiettato al 2020.

d) Scenario Zero Out: è un ipotetico scenario derivato dallo scenario base ma nel quale tutte le emissioni antropogeniche dell'Umbria sono state poste a zero; serve ad avere un'idea del margine di manovra che avrebbero le eventuali misure di riduzione delle emissioni a carattere regionale.

ANALISI DELLE PERFORMANCE

Sono state confrontate le concentrazioni orarie o giornaliere degli inquinanti misurati dalla Rete Regionale di Monitoraggio della Qualità dell'Aria e le corrispondenti concentrazioni stimate dal modello. Per rendere quantitativo tale confronto, sono stati utilizzati alcuni indici statistici di performance [3][4] applicati alle coppie di valori O_i e P_i, con O_i concentrazione (oraria o giornaliera) osservata e P_i concentrazione (oraria o giornaliera) simulata con lo scenario base, entrambe espresse in $\mu g/m^3$. Gli indicatori di valutazione statistica scelti sono: Fractional Bias (FB), Normalised Mean Bias Factor (NMBF), Normalised Mean Square Error (NMSE), coefficiente di correlazione (R) e Skill-Var (SKILL-VAR); questi sono tutti adimensionali e così definiti:

$$FB = 2 \cdot \frac{\overline{P} - \overline{O}}{\overline{P} + \overline{O}} \tag{1}$$

$$NMBF = \begin{cases} \dfrac{\overline{P} - \overline{O}}{\overline{P}}; & se \ \left(\overline{P} - \overline{O}\right) < 0 \\ \dfrac{\overline{P} - \overline{O}}{\overline{O}}; & se \ \left(\overline{P} - \overline{O}\right) > 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$NMSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(P_i - O_i\right)^2}{\overline{P} \cdot \overline{O}} \tag{3}$$

$$R = \frac{\sigma_{PO}}{\sigma_P \cdot \sigma_O} \tag{4}$$

$$SKILL - VAR = \frac{\sigma_P}{\sigma_O} \tag{5}$$

I valori assunti da tali indici per gli inquinanti O_3, NO_2 e PM_{10} sono riportati rispettivamente nelle tabelle da 1 a 3. I risultati mostrano un generale buon accordo tra i valori stimati e quelli misurati.

Questo buon accordo è confermato anche dal confronto tra i dati orari. Nelle figure da 3 a 6 si riportano gli andamenti settimanali di O_3 e bisettimanali di PM_{10} delle concentrazioni simulate e misurate a Ponte S.Giovanni (Perugia) e a Via Verga (Terni).

Tabella 1: Indici di performance per O_3

Indice	Valore min/ottimale/max	PERUGIA P.S.Giovanni	TERNI Via Verga
R	-1 / +1 / +1	0.765	0.734
FB	-2 / 0 / +2	0.360	0.096
NMBF	-∞ / 0 / +∞	0.438	0.101
SKILL-VAR	0 / 1 / +∞	1.017	1.092
NMSE	0 / 0 / +∞	0.336	0.312

Tabella 2: Indici di performance per il PM_{10}

Indice	Valore min/ottimale/max	PERUGIA P.S.Giovanni	TERNI Via Verga
R	-1 / +1 / +1	0.640	0.422
FB	-2 / 0 / +2	-0.803	-0.502
NMBF	-∞ / 0 / +∞	-1.341	-0.671
SKILL-VAR	0 / 1 / +∞	0.369	0.415
NMSE	0 / 0 / +∞	1.238	0.694

Tabella 3: Indici di performance per il NO_2

Indice	Valore min/ottimale/max	PERUGIA P.S.Giovanni	TERNI Via Verga
R	-1 / +1 / +1	0.461	0.358
FB	-2 / 0 / +2	-0.004	0.628
NMBF	-∞ / 0 / +∞	-0.004	0.916
SKILL-VAR	0 / 1 / +∞	1.215	1.950
NMSE	0 / 0 / +∞	0.581	1.118

SCENARI DI QUALITÀ DELL'ARIA

I risultati relativi agli scenari Base, CLE2010, CLE2020 e Zero Out sono riportati in forma grafica come mappe di isoconcentrazione. I risultati si riferiscono a tre inquinanti principali, ovvero O_3, PM_{10} e NO_2. Nelle figure sono mostrati i valori medi sull'intero periodo di simulazione di questi tre inquinanti. Per il solo O_3, ovvero per l'inquinante la cui media annuale simulata è più vicina a quella osservata, è stato calcolato un indice di legge con soglia, ovvero il numero di superamenti della soglia di 120 $\mu g/m^3$ della media mobile su 8 ore.

Nelle figure da 7 a 10 sono mostrati i risultati relativi alla simulazione dello Scenario Base, nelle figure da 11 a 14 quelli relativi allo Scenario CLE2010, nelle figure da 15 a 18 quelli relativi allo Scenario CLE2020 e nelle figure da 19 a 22 quelli relativi allo Scenario ZeroOut.

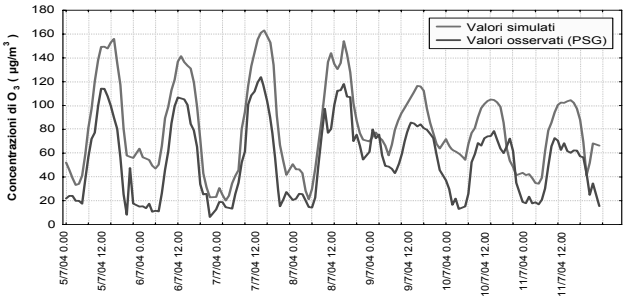


Figura 3: Dati orari di O_3 stimati e misurati a Ponte S.Giovanni (Perugia) nella prima settimana lavorativa di luglio dell'anno 2004

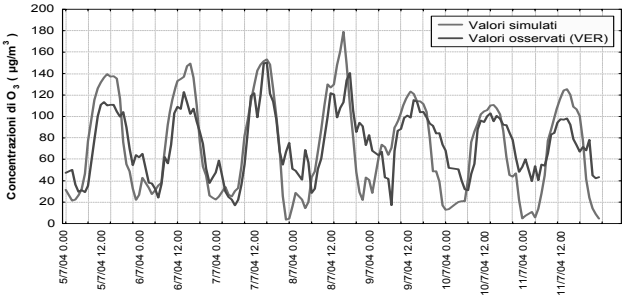


Figura 4: Dati orari di O_3 stimati e misurati a Via Verga (Terni) nella prima settimana lavorativa di luglio dell'anno 2004

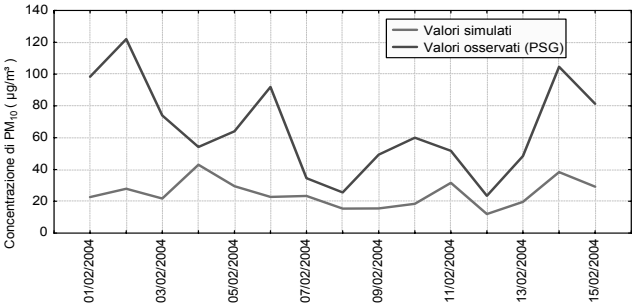


Figura 5: Dati giornalieri di PM_{10} stimati e misurati a Ponte S.Giovanni (Perugia) nei primi 15 giorni di febbraio 2004

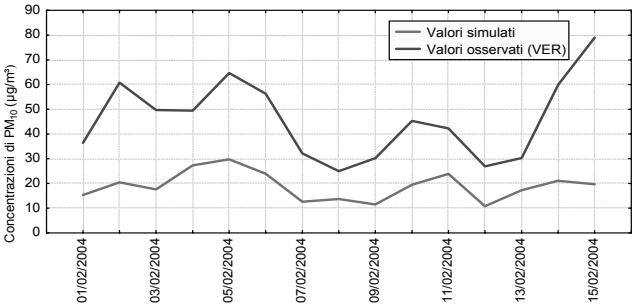


Figura 6: Dati giornalieri di PM_{10} stimati e misurati a Via Verga (Terni) nei primi 15 giorni di febbraio 2004

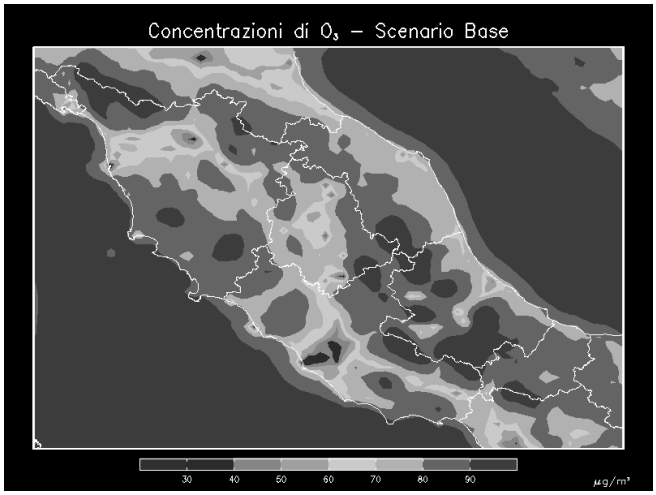


Figura 7: Concentrazione media annua di O_3 – Scenario Base

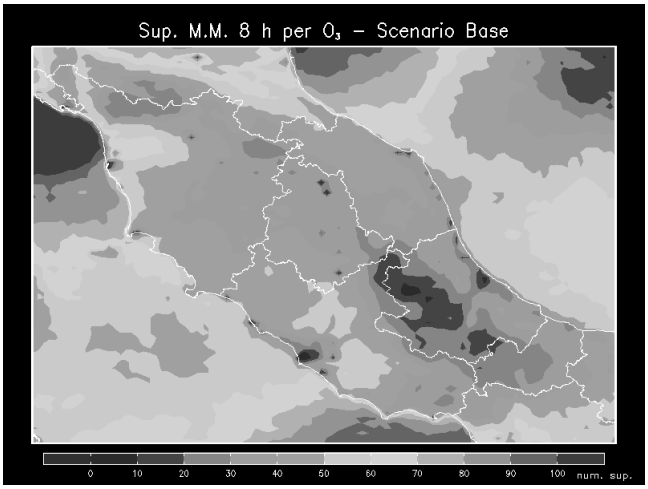


Figura 8: Numero di superamenti di 120 μg/m^3 della media mobile su 8 ore per O_3 – Scenario Base

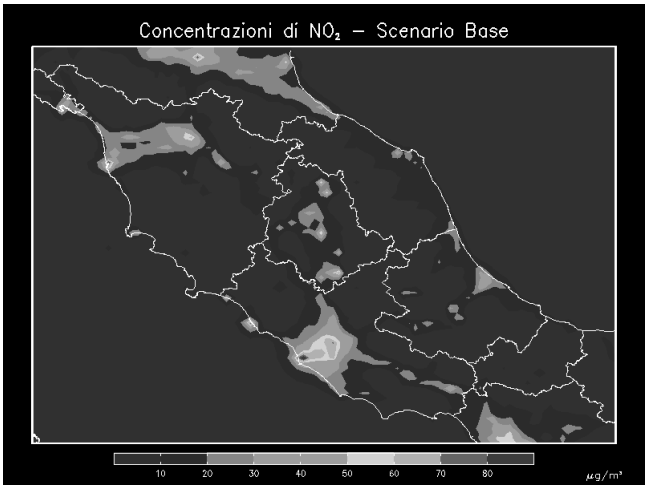


Figura 9: Concentrazione media annua di NO_2 – Scenario Base

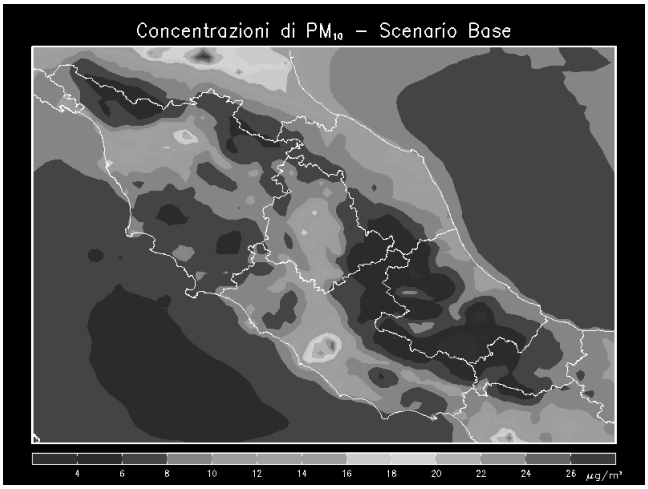


Figura 10: Concentrazione media annua di PM_{10} – Scenario Base

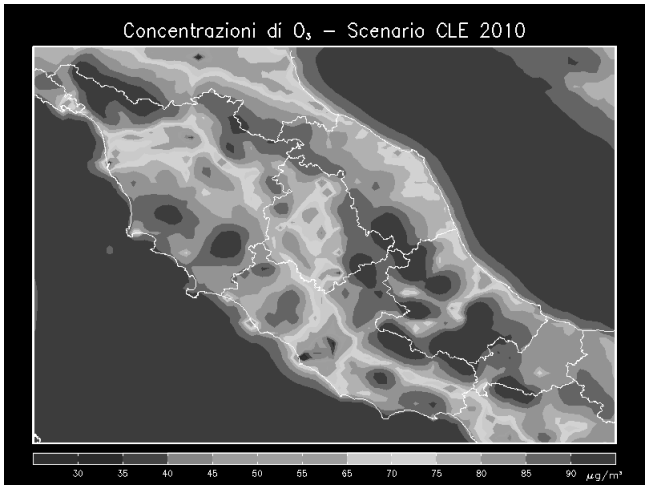


Figura 11: Concentrazione media annua di O_3 – Scenario CLE2010

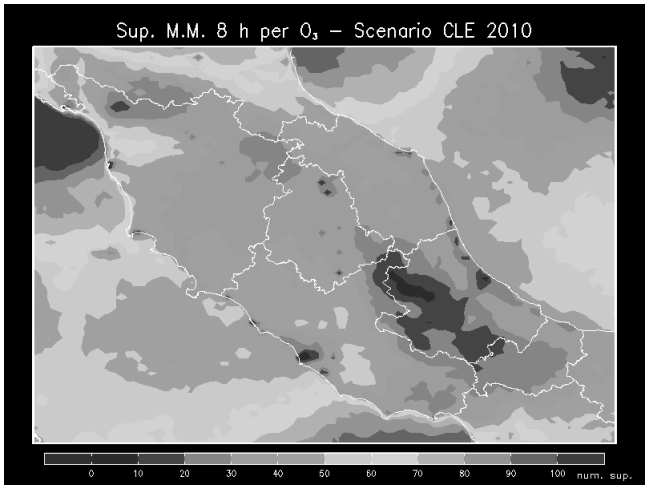


Figura 12: Numero di superamenti di 120 μg/m^3 della media mobile su 8 ore per O_3 – Scenario CLE2010

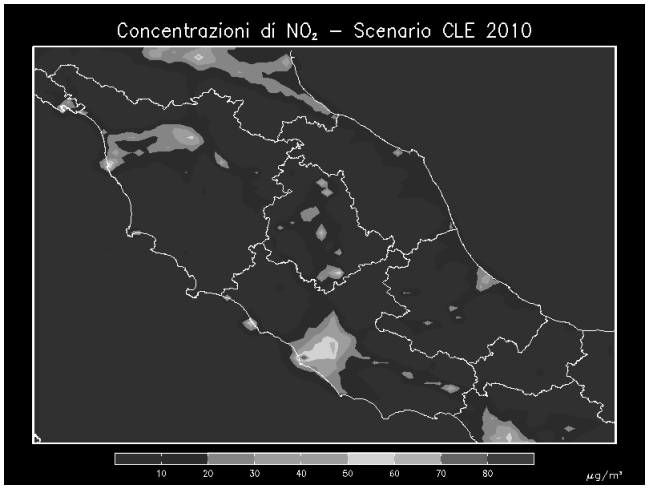


Figura 13: Concentrazione media annua di NO_2 – Scenario CLE2010

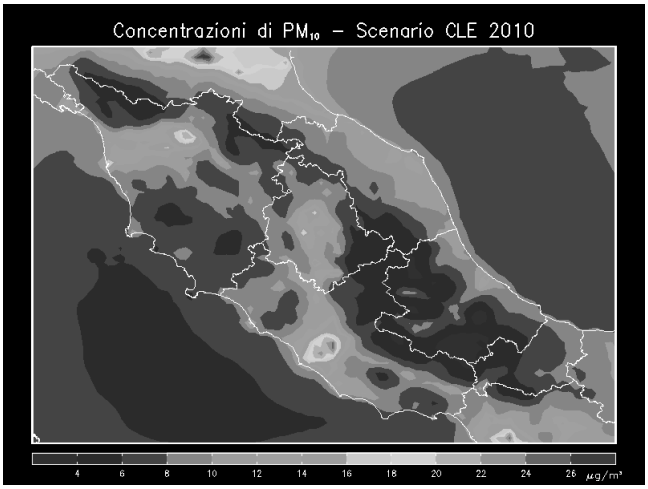


Figura 14: Concentrazione media annua di PM_{10} – Scenario CLE2010

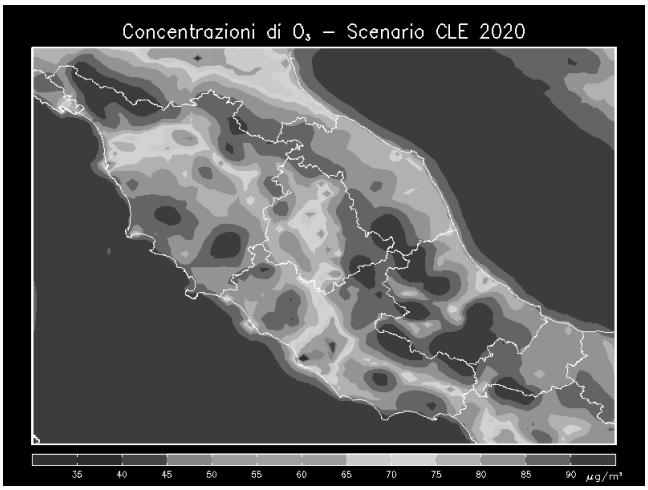


Figura 15: Concentrazione media annua di O_3 – Scenario CLE2020

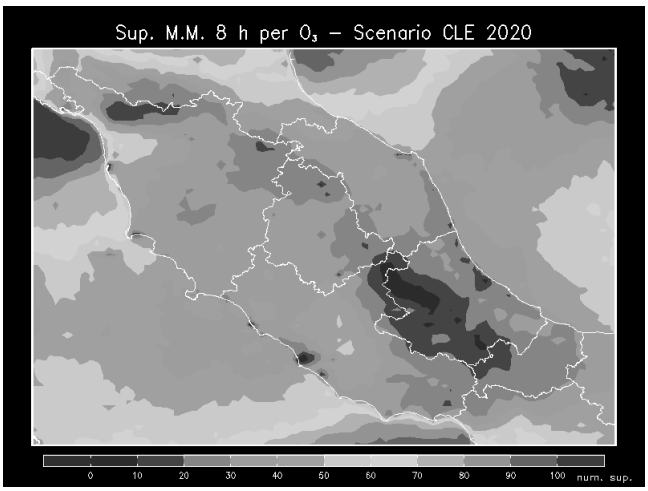


Figura 16: Numero di superamenti di 120 µg/m^3 della media mobile su 8 ore per O_3 – Scenario CLE2020

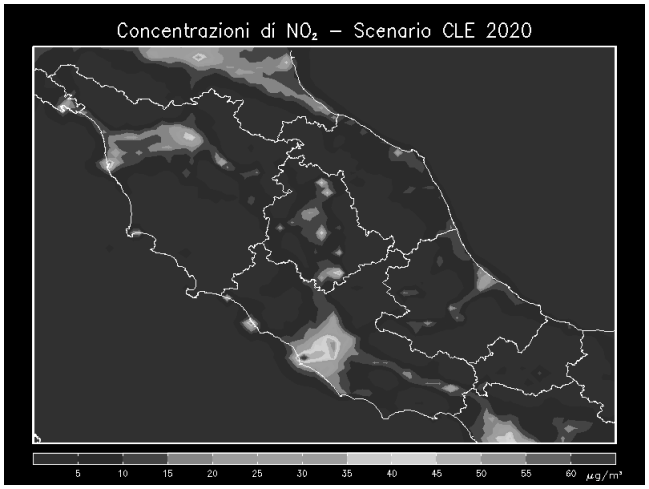


Figura 17: Concentrazione media annua di NO_2 – Scenario CLE2020

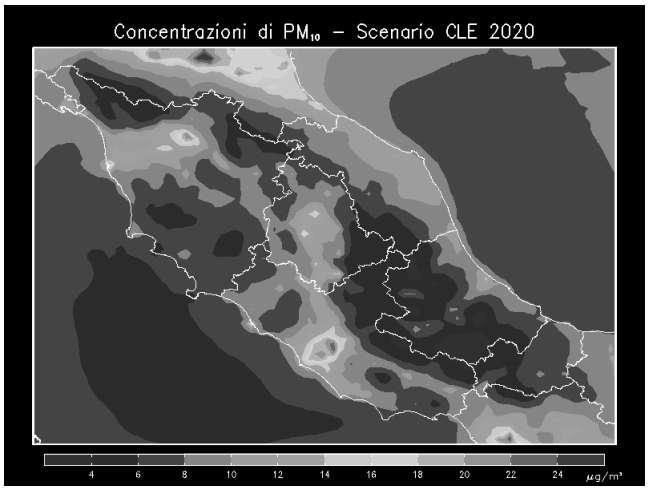


Figura 18: Concentrazione media annua di PM_{10} – Scenario CLE2020

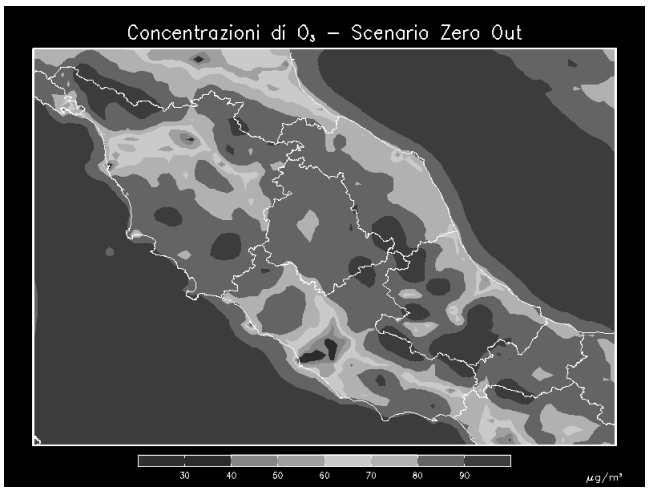


Figura 19: Concentrazione media annua di O_3 – Scenario ZeroOut

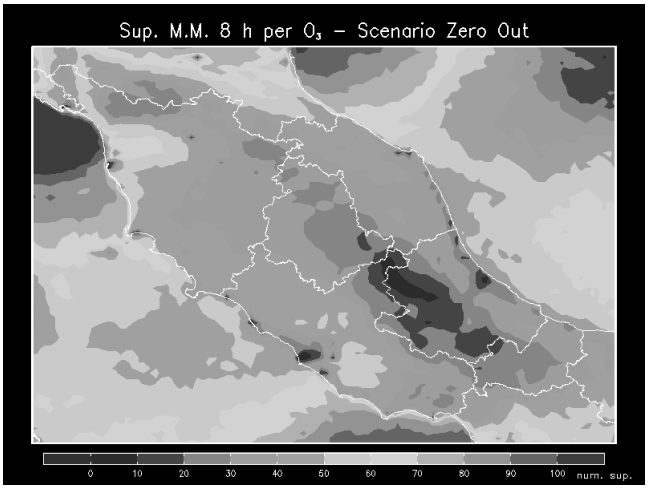


Figura 20: Numero di superamenti di 120 μg/m^3 della media mobile su 8 ore per O_3 – Scenario ZeroOut

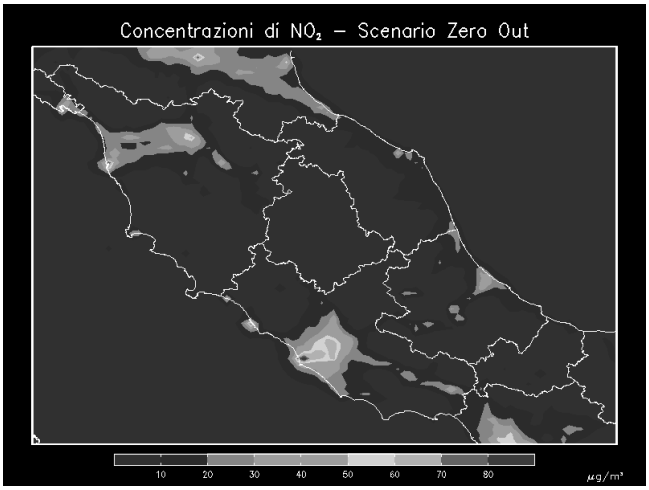


Figura 21: Concentrazione media annua di NO_2 – Scenario ZeroOut

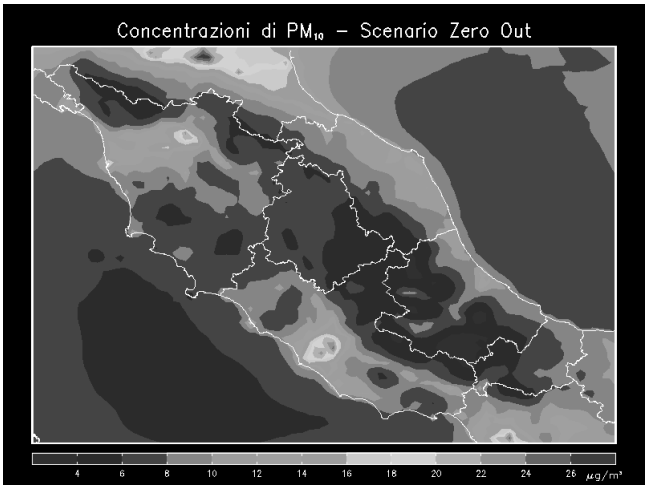


Figura 22: Concentrazione media annua di PM_{10} – Scenario ZeroOut

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha mostrato i risultati delle simulazioni realizzate con la catena modellistica basata su Chimere.

Con questa è stata realizzata una simulazione relativa allo scenario base per l'anno 2004. I dati prodotti da questa simulazione sono stati confrontati con quelli misurati da stazioni fisse di monitoraggio della qualità dell'aria tramite il calcolo di alcuni indici di performance. Il confronto ha mostrato, in generale, un buon accordo tra questi due set di dati e, pertanto, è ipotizzabile un accordo altrettanto buono anche nelle altre zone non coperte da punti di misura. Per lo stesso motivo, è legittimo ipotizzare anche che il metodo dia delle stime realistiche negli scenari.

Oltre allo scenario base, sono state realizzate simulazioni relative a ipotetici scenari futuri che tengono in considerazione le misure di riduzione delle emissioni contenute nello scenario emissivo nazionale [2] e che sono già previste dalla legislazione vigente. Tali scenari sono stati realizzati scalando i dati emissivi iniziali secondo le percentuali di riduzioni previste dallo scenario nazionale. I risultati ottenuti, a fronte di un taglio delle emissioni, mostrano una effettiva riduzione delle concentrazioni in aria di PM_{10} e NO_2 e un aumento delle concentrazioni di O_3.

Gli effetti sulle concentrazione in aria degli inquinanti visti con gli scenari CLE2010 e CLE2020 si ripropongono in maniera amplificata con lo scenario ZeroOut. Questo, inoltre, è un indice, anche se grezzo, di quale massima riduzione sarebbe ipoteticamente possibile agendo sulle emissioni antropogeniche.

Questi scenari di test, realizzati con dati di partenza relativi al 2004, hanno mostrato però l'efficacia della catena modellistica implementata quale strumento di supporto alle valutazioni necessarie alla pianificazione del miglioramento e del mantenimento della qualità dell'aria essenziali per la stesura di un Piano Regionale.

Pertanto, le possibili applicazioni future sono la realizzazione di un nuovo scenario base con i dati più aggiornati, (magari utilizzando l'anno 2007 relativo all'ultimo aggiornamento dell'Inventario Regionale delle Emissioni) insieme a scenari futuri che possano tener conto delle riduzioni emissive previste a livello europeo, nazionale e regionale.

BIBLIOGRAFIA

1. The Chimere chemistry-transport model. A multi-scale model for air quality forecasting and simulation. Institut Pierre-Simon Laplace, INERIS, LISA, CNRS. http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/
2. ENEA e Ministero dell'ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, RAINS scenarios for estimation of emissions with and without measures, 2006
3. Borrego, C., Monteiro, A., Ferriera, J., Miranda, A.I., Costa, A.M., Carvalho, A.C., Lopes, M., Procedures for estimation of modelling uncertainty in air quality assessment, *Environment International*, vol. 34, pp. 613-620, 2008.
4. ISPRA (ex APAT), Rapporto tecnico sulla applicazione di modellistica al bacino padano adriatico, 2006 http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Temi/Aria/Documenti_tecnici/

SULLA RIDUZIONE DEI MACROINQUINANTI ATMOSFERICI IN ITALIA, DERIVANTE DALL'APPLICAZIONE DELLA NORMATIVA IPPC AI GRANDI IMPIANTI INDUSTRIALI

Dario Ticali[1], Franco Cotana[2], Maria Cleofe Merico[2], Sara Rinaldi[2]

[1] Commissione IPPC AIA Ministero dell'Ambiente Tutela del Territorio e del Mare
[2] CRB, Centro di Ricerca sulle Biomasse, Str. S. Lucia Canetola,06125 Perugia

SOMMARIO

La riduzione delle emissioni inquinanti derivati da attività industriali ad elevato impatto ambientale, attraverso l'adozione delle migliori tecniche disponibili (MTD oppure BAT - Best Available Tecnique), è tra gli obiettivi principali della direttiva IPPC (Integrated Prevention Pollution and Control). La direttiva Europea 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento è stata recepita in Italia dal D.Lgs. 4 agosto 1999, n. 372, dopo vari provvedimenti normativi; all'attuazione integrale si è provveduto con il D.Lgs. 18 febbraio 2005, n.59. Fino a giugno 2008 solo 5 impianti di competenza nazionale avevano ricevuto l'Autorizzazione Integrata Ambientale ai sensi della direttiva IPPC, di questi quattro nel 2006 e solo uno nel periodo da giugno 2006 a giugno 2008. Nei successivi 10 mesi la commissione nazionale IPPC, istituita presso il Ministero dell'Ambiente e recentemente rinnovata, ha avviato l'istruttoria di oltre 100 impianti e completato l'istruttoria di 32 grandi impianti industriali proponendo al ministro, per tali impianti, il rilascio dell'AIA (Autorizzazione Ambientale Integrata). Nelle suddette autorizzazione AIA vengono adottate le BAT e ridotti in modo significativo le emissioni inquinanti; particolare rilevanza assumono i macroinquinanti (CO, SOx, NOx, polveri) immessi in atmosfera. In questo lavoro sono valutate le riduzioni in termini di flussi di massa dei macroinquinanti a seguito del rilascio delle Autorizzazioni Integrate Ambientali dei 32 impianti esaminati .

1. INTRODUZIONE

L'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) é il provvedimento che autorizza l'esercizio di un impianto o di parte di esso a determinate condizioni, che devono garantire la conformità ai requisiti del decreto legislativo 18 febbraio 2005, n. 59, di recepimento della direttiva comunitaria 96/61/CE, relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento (IPPC). L'AIA prevede misure intese ad evitare oppure, qualora non sia possibile, ridurre le emissioni nell'aria, nell'acqua, nel suolo e la produzione dei rifuti per conseguire un livello elevato di protezione dell'ambiente nel suo complesso.

L'autorizzazione deve includere valori limite di emissione fissati per le sostanze inquinanti, in particolare quelle elencate nell'allegato III, che possono essere emesse dall'impianto interessato in quantità significativa, in considerazione della loro natura e delle loro potenzialità di trasferimento dell'inquinamento da un elemento ambientale all'altro (acqua, aria e suolo), nonché i valori limite di emissione e immissione sonora ai sensi della vigente normativa in materia di inquinamento acustico. I valori limite di emissione fissati nelle autorizzazioni integrate non possono comunque essere meno rigorosi di quelli fissati dalla vigente normativa nazionale o regionale.

Se necessario, l'autorizzazione integrata ambientale contiene ulteriori disposizioni che garantiscono la protezione del suolo e delle acque sotterranee. Se necessario, i valori limite di emissione possono essere integrati o sostituiti con parametri o misure tecniche equivalenti.

I valori limite di emissione tengono conto delle modalità pratiche adatte a tali categorie di impianti nonché dei costi e dei benefici, tenendo conto delle caratteristiche tecniche dell'impianto in questione, della sua ubicazione geografica e delle condizioni locali dell'ambiente.

In tutti i casi, le condizioni di autorizzazione prevedono disposizioni per ridurre al minimo l'inquinamento a grande distanza o attraverso le frontiere e garantiscono un elevato livello di protezione dell'ambiente nel suo insieme.

Ai sensi di quanto previsto dall'articolo 16 del citato D.Lgs. 59/05, tale autorizzazione é necessaria per poter esercire le attività specificate nell' allegato I dello stesso decreto.

Le politiche comunitarie e nazionali sulla prevenzione e la riduzione integrate dell'inquinamento prodotto da impianti industriali di rilevante impatto ambientale, hanno messo in evidenza l'importanza, tra gli altri strumenti d'azione, della promozione e dell'assistenza all'attività industriale per l'adozione di nuove tecniche ecocompatibili (si parla in proposito di BAT - Best Available Techniques). L'Autorizzazione Integrata Ambientale sostituisce ad ogni effetto di legge ogni altra autorizzazione ambientale fatte salve le disposizioni di cui al decreto legislativo 17 agosto 1999, n. 334, e le autorizzazioni ambientali previste dalla normativa di recepimento della direttiva 2003/87/CE.

Con l'AIA vengono anche definite le modalità di esercizio ed i relativi valori limite di emissioni cui l'impianto è soggetto, nonché le attività di monitoraggio obbligatorie cui il gestore deve adempiere per tutta la validità dell'AIA stessa.

Come anticipato il primo decreto legislativo che disciplina la riduzione integrata dell'inquinamento è il 372/99 e individua nella Commissione VIA (Valutazione di Impatto Ambientale) l'Autorità Competente, l'autorità statale competente mentre rinvia alle Regioni per gli impianti di dimensioni inferiori.

Occorre attendere il D. Lgs. 59/2005 di recepimento della direttiva comunitaria 96/61/CE (IPPC) per attribuire giusto valore all'AIA. Infatti con tale decreto si individua per gli impianti di dimensione statale, come autorità competente

apposita commissione nominata per la valutazione istruttoria finalizzata al rilascio dell'AIA o alla valutazione delle modifiche sostanziali connesse al riesame dell'AIA stessa.

Lo stesso decreto integra la commissione di nomina ministeriale con esperti di nomina della Regione, Provincia e Comune territorialmente competente e, nel rispetto del protocollo di Aarhus, disciplina altresì la partecipazione pubblica al procedimento di istruttoria tecnica sulle domande di autorizzazione.

Viene inoltre disciplinata la predisposizione di un inventario delle principali emissioni di inquinanti dovute alle attività industriali e produttive regolamentate la cui compilazione obbliga il gestore a dichiarare le emissioni connesse all'impianto industriale.

L'AIA infatti contiene gli opportuni requisiti di controllo delle emissioni che specificano, in conformità a quanto disposto dalla vigente normativa in materia ambientale e nel rispetto delle linee guida di cui all'articolo 4 comma 1, la metodologia e la frequenza di misurazione, la relativa procedura di valutazione, nonché l'obbligo di comunicare all'autorità competente i dati necessari per verificarne la conformità alle condizioni di autorizzazione integrata ambientale ed all'autorità competente e ai comuni interessati i dati relativi ai controlli delle emissioni richiesti dall'autorizzazione integrata ambientale.

Infine, onde verificare l'adozione delle migliori tecniche disponibili e poter garantire nel tempo la prevenzione e riduzione dell'inquinamento, l'autorizzazione è rilasciata con una validità da cinque a otto anni in funzione delle certificazioni ambientali di cui è in possesso il gestore.

Tutti i gestori degli impianti compresi nella lista riportata negli allegati della direttiva IPPC dovranno pertanto richiedere negli anni il rinnovo dell'autorizzazione all'esercizio, dimostrando l'adeguatezza degli impianti esistenti alle norme generali contenute nel decreto legislativo stesso ed alle migliori tecniche man mano disponibili.

Sebbene il D. Lgs. 59/2005 imponeva il rilascio dell'AIA agli impianti industriali entro il mese di ottobre dell'anno 2007, i ritardi maturati, hanno imposto al governo di prorogare con decreto-legge 180/2007, successivamente convertito con la legge di conversione 19 dicembre 2007 n. 243 "Differimento di termini in materia di autorizzazione integrata ambientale e norme transitorie", la scadenza al 31 marzo 2008 il termine entro il quale gli impianti esistenti devono attuare le prescrizioni contenute nell'autorizzazione integrata ambientale.

In ultimo, il D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 e s.m.i. (Testo Unico dell'Ambiente), nella sua Parte II, così come modificato dal recente D.Lgs. 16 gennaio 2008, n.4 (Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del Dlgs 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale, in S.O. n. 24 alla G.U. 29 gennaio 2008 n. 24), in un'ottica di semplificazione e riduzione dei tempi del procedimento, nel disciplinare le valutazioni ambientali maggiormente rilevanti quali, la Valutazione Ambientale Strategica (VAS) e la Valutazione dell'Impatto Ambientale (VIA), in un'ottica di semplificazione e riduzione dei tempi, norma il rilascio dell'AIA quale atto endoprocedimentale della VIA.

2. DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI E OBIETTIVI DELLO STUDIO

Il presente studio è volto a valutare gli effettivi benefici ottenuti con l'applicazione dell'AIA in termini di riduzione di emissioni in atmosfera di macroinquinanti: monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x) e polveri.

Per la valutazione dei benefici in termini di riduzione delle emissioni a seguito di AIA, è stato selezionato un campione rilevante di impianti soggetti all'Autorizzazione Integrata Ambientale, la cui istruttoria è stata completata nel periodo compreso tra luglio 2008 e maggio 2009. In particolare sono stati considerati 25 impianti di potenza (tradizionali a vapore, turbogas, IGGC - Integrated Gasification Combined Cycle, ciclo combinato), 5 raffinerie, 1 impianto chimico ed un rigassificatore (Tab.1).

Tabella 1: tipologie di impianti

IMPIANTI DI POTENZA			
Tipologia Impianti	**N° Impianti**	**Potenza Elettrica [MW]**	**Potenza Termica [MW]**
Turbogas	4	1129.36	3554.67
Ciclo Combinato	10	7220.70	13890.48
Centrali termoelettriche tradizionali	10	6114.17	16361.50
IGCC	1	339.30	581.41
Totale Impianti di Potenza	**25**	**14803.53**	**34388.07**
ALTRI IMPIANTI			
Tipologia Impianti	**N° Impianti**	**Potenza Elettrica [MW]**	**Potenza di Combustione [MW]**
Raffinerie	**5**	**70**	**1293.10**
Rigassificatore	**1**	**33.75**	**101.48**
	N° Impianti	**Energia Termica Prodotta [MWh]**	
Impianti chimici	**1**	**250000**	

Per ciascun impianto considerato è stata esaminata la relativa documentazione fornita dal Gestore e il Parere Istruttorio conclusivo; tale analisi ha permesso di estrapolare la tipologia di impianto, la potenza termica ed elettrica installata, la capacità produttiva, la portata dei fumi, le tecnologie adottate, i miglioramenti apportabili, i limiti di emissione autorizzati e i limiti proposti a seguito del procedimento di AIA. Tali dati sono stati necessari per l'applicazione della metodologia di calcolo della riduzione delle emissioni descritta nel paragrafo 3.

3. METODOLOGIA DI CALCOLO DELLE EMISSIONI DI MACROINQUINANTI

I valori delle emissioni complessive dei macroinquinanti sono ottenuti, con metodo standard, come disposto in [1]. Nel presente studio, al fine di effettuare un confronto tra le emissioni totali nello scenario attuale e quelle stimate nell'assetto futuro, è stata adattata tale metodologia in base ai dati disponibili calcolando le emissioni complessive annuali alla capacità produttiva, determinate dai valori limite di emissione previsti e dalla portata massima dei fumi al camino. Di seguito si riporta una descrizione delle metodologie citate.

3.1 Calcolo Emissioni Reali- Metodologia Standard

Le emissioni annue di un generico impianto sono calcolate come prodotto tra il volume dei fumi emessi nel corso dell'anno solare per la relativa concentrazione media. Le emissioni quindi, espresse in tonnellate/anno, sono determinabili secondo la seguente relazione "Eq. (1)":

$$E_i = VF \cdot C_i \quad (1)$$

dove
E_i: emissioni di un generico macroinquinante i [t/anno];
VF: volume complessivo dei fumi emessi [Nm^3/anno];
C_i: concentrazione media del generico inquinante i [mg/Nm^3].

Il volume dei fumi complessivo è disponibile per tutti gli impianti nella relativa documentazione fornita dal Gestore alla Commissione AIA (scheda B 3.2). Tale valore può essere misurato in continuo, in impianti che dispongono di sistemi di monitoraggio in continuo, oppure calcolato in base alla composizione percentuale in peso sul secco dei singoli componenti costituenti il combustibile utilizzato secondo quanto specificato in [1] Eq. (2).

$$VF_{SP} = 8.86 \cdot C + 28.89 \cdot H_2 + 3.31 \cdot S + (0.8 \div 7.6) \cdot N_2 + 2.63 \cdot O_2 \quad (2)$$

dove:
VF_{SP}: volume dei fumi emessi per kg di combustibile bruciato [Nm^3/kg];
C, H_2, S, N_2, O_2: carbonio, idrogeno, zolfo, azoto e ossigeno rispettivamente contenuti in un kg di combustibile [kg].

Il coefficiente per l'azoto varia in funzione delle forme chimiche assunte. Per combustibili gassosi si assume pari a 0.8, per combustibili solidi o liquidi si assume pari a 7.6 se l'azoto esce sottoforma di NO_2, o un coefficiente mediato pari a 4.76 per una composizione standard di 0.05 in NO_2 e 0.95 in NO.

Le concentrazioni medie posso essere calcolate in base alla disposizioni in [1], oppure misurate tramite un sistema di monitoraggio in continuo ove presente, che permette di rilevare le concentrazioni medie orarie, mensili e l'eventuale calcolo di quelle annuali.

3.2 Calcolo delle Emissioni alla Massima Capacità Produttiva

Nella documentazione relativa agli impianti considerati sono disponibili, ai fini del calcolo, le concentrazioni medie dei singoli inquinanti relativamente allo scenario attuale, ma non sono sempre disponibili le concentrazioni stimate nell'assetto futuro. La valutazione delle emissioni totali in assetto futuro è stata pertanto effettuata adottando il valore limite di emissione autorizzato a seguito di AIA. Per pervenire a valori omogenei e confrontabili è stato effettuato lo stesso procedimento di calcolo anche per lo scenario precedente all'AIA, adottando i valori limite di emissione autorizzati. Le emissioni sono state inoltre calcolate alla capacità produttiva, definita come "la capacità relazionabile al massimo inquinamento potenziale dell'impianto." [2].

Le emissioni relative alla capacità produttiva sono state determinati in base alla relazione (Eq. (3)):

$$Ei_{CP} = VLi \cdot VF_{CP} \cdot H \quad (3)$$

dove:
Ei_{CP}: emissioni annue del generico inquinante i alla capacità produttiva[t/anno];
VLi: limite autorizzato/proposto per l'inquinante i [mg/Nm^3];
VF_{CP}: volume dei fumi alla capacità produttiva [Nm^3/h];
H: ore di funzionamento annuale [h/anno].

Per quanto concerne le centrali termoelettriche tradizionali si stimano i dati a partire dai valori di targa degli impianti ipotizzando un funzionamento in continuo 8760 ore/anno.

La capacità produttiva risulta di problematica definizione per un impianto Turbogas. Ove non esplicitamente definito un limite legale di esercizio, tuttavia, sono state considerate 8760 ore di funzionamento all'anno.

4. RISULTATI

Come si evince dalla figura 1, lo studio condotto ha rilevato una netta diminuzione delle emissioni di tutti i macroinquinanti considerati. In particolare le emissioni di ossidi di zolfo mostrano una riduzione percentuale più alta rispetto agli altri macroinquinanti esaminati.

La riduzione delle emissioni per ogni singolo inquinante è riportata in tabella 2 e in forma grafica in figura 1.

Tabella 2: riduzione di emissioni a seguito di AIA

IMPIANTO	Δ CO [t]	Δ NOx [t]	Δ Polveri [t]	Δ SOx [t]
Turbogas (4)	-1744	-21642	0	0
Ciclo Combinato (10)	-5483	-5871	-950	-7289
CTE Tradizionale (10)	-22989	-14927	-2593	-70127
IGCC (1)	0	0	0	0
Raffinerie (5)	-95	-745	-113	-3033
Rigassificatori (1)	93	116	0	0
Impianti Chimici (1)	7	5	1	0
TOTALE	**-30211**	**-43063**	**-3654**	**-80450**

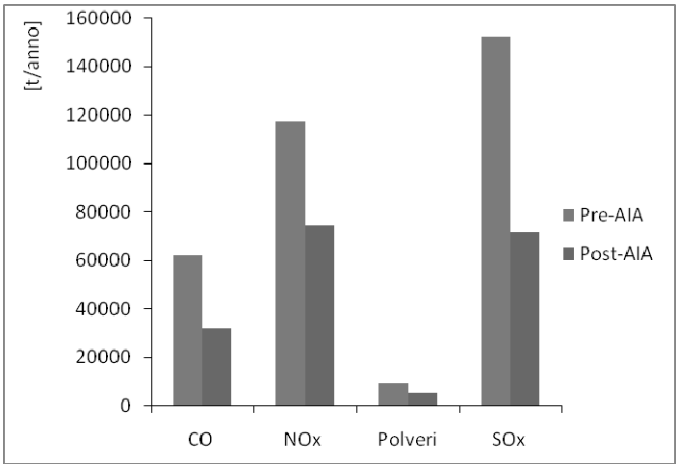


Figura 1: emissioni macro inquinanti - Assetto pre e post AIA

Le figg. 2,3,4,5 mostrano per ciascun inquinante le emissioni a seguito delle prescrizioni imposte dall'AIA e la riduzione in termini percentuali e di tonnellate all'anno, rispetto allo scenario attuale. I risultati evidenziano una rilevante diminuzione delle emissioni di tutti i macroinquinanti esaminati. La riduzione più marcata si verifica per gli SO_x, ed è pari a circa il 53% ripetto al valore delle emissioni di tale inquinante prima dell'applicazione

dell'AIA (fig.5). Il monossido di carbonio presenta una riduzione percentuale del 49% (fig.2). Le emissioni di polveri si riducono del 40% (fig.4), mentre le emissioni di NO_x presentano una diminuzione pari al 37% (fig.3).

La riduzione delle emissioni ottenuta è attribuibile in percentuale maggiore del 98% ai grandi impianti di combustione. In particolare i risultati evidenziano come la maggior riduzione di SO_x, CO e delle polveri si ha nelle centrali termoelettriche tradizionali; la ragione risiede nel fatto che a seguito di AIA suddetti impianti sono stati migliorati dal punto di vista dell'impatto ambientale (limitazione sul contenuto di zolfo del combustibile, cambio del combustibile impiegato, desolforazione). La riduzione più alta di NO_x si ha invece nelle centrali turbogas (fig.6).

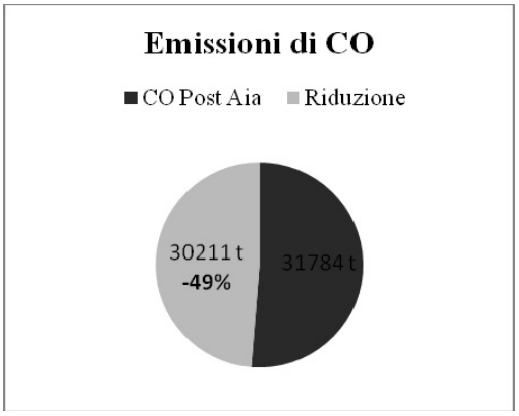


Figura 2: riduzione delle emissioni di monossido di carbonio

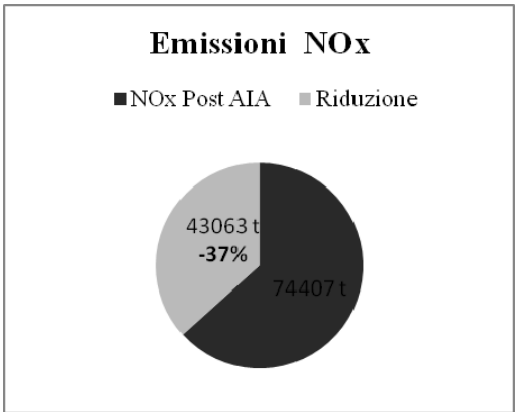


Figura 3: riduzione delle emissioni di NO_x

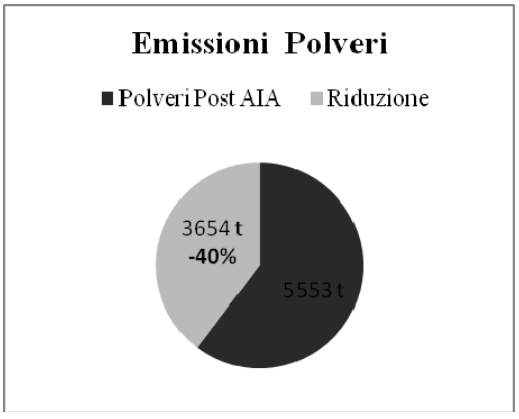


Figura 4: riduzione delle emissioni delle polveri

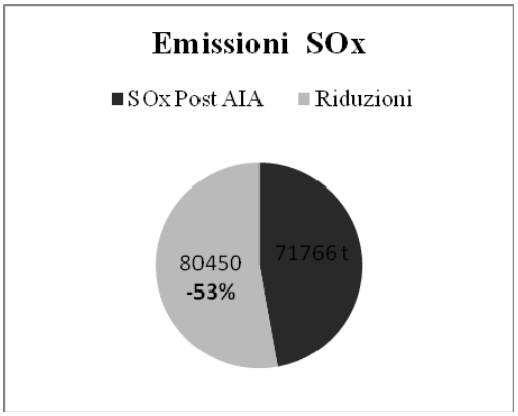


Figura 5: riduzione delle emissioni di SO_x

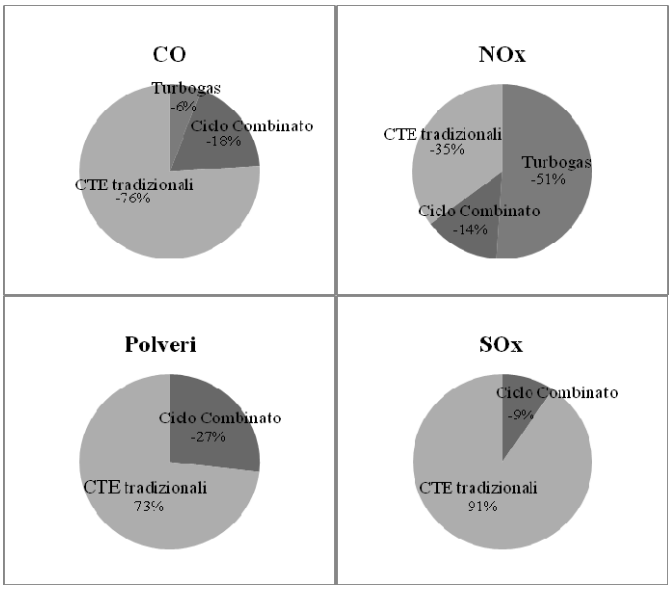


Figura 6: riduzione percentuale delle emissioni dei grandi impianti di combustione

5. CONCLUSIONI

Dallo studio condotto è emerso che l'AIA rappresenta un valido strumento di governo per la tutela del territorio e della salute, nonché per il controllo degli impatti ambientali dei grandi impianti industriali.

Fino a giugno 2008 solo 5 impianti di competenza nazionale avevano ricevuto l'Autorizzazione Integrata Ambientale ai sensi della direttiva IPPC, di questi quattro nel 2006 e solo uno nel periodo da giugno 2006 a giugno 2008. Nei successivi 10 mesi la commissione nazionale IPPC, istituita presso il Ministero dell'Ambiente, ha avviato l'istruttoria di oltre 100 impianti e completato l'istruttoria di 32 grandi impianti industriali proponendo al ministro, il rilascio dell'AIA (Autorizzazione Ambientale Integrata).

Come rilevato nel presente studio, il rilascio dell'AIA ha comportato da subito una riduzione dell'inquinamento variabile dal 30 al 55% e soprattutto ha avviato una fase di controllo da parte dell'autorità competente di tutti gli impianti industriali autorizzati, rendendone anche più trasparente l'effettivo esercizio.

La conclusione nel rilascio dell'AIA sia a livello statale sia a livello regionale, agevolerà nel raggiungimento dell'obiettivo di ridurre nel prossimo decennio di oltre il 20%

le emissioni in atmosfera di alcuni inquinanti e di migliorare l'attuale stato di qualità dell'aria di alcuni territori già riconosciuti particolarmente critici anche in ambito comunitario.

Il continuo aggiornamento delle tecnologie disponibili ed il supporto scientifico della ricerca industriale, aiuteranno il governo nazionale, ma anche quello comunitario, ad adottare forme di limitazione gestionale ai grandi impianti industriali incentivando forme di sviluppo sostenibile tanto auspicate in ambito internazionale.

L'approccio integrato (aria, acqua suolo) e la valutazione sito-specifica su cui si fonda l'AIA, infine, rappresenta una opportuna metodologia di valutazione che non può essere affrontata in maniera generale per ogni categoria e tipologia di impianto, ma che si basa su linee guida specifiche.

Nel paragrafi precedenti è stata descritta la metodologia adottata per il calcolo delle riduzioni dei macroinquinanti in 32 grandi impianti industriali soggetti ad AIA.

I risultati sono stati uniformati con lo scopo di ottenere un quadro che fosse quanto più omogeneo per trarre delle valutazioni sostanziali.

L'analisi effettuata attesta l'effettiva importanza della Autorizzazione Integrata Ambientale nella riduzione degli inquinanti emessi in atmosfera, contribuendo in maniera sostanziale al contenimento dell'inquinamento. Applicando l'AIA ai 32 impianti considerati si ottiene una diminuzione dei macroinquinanti. L'incremento di efficienza di ogni singolo impianto o parte di esso, rappresenta infine una valida scelta di prevenzione dell'inquinamento.

I valori riportati in tabella 2 saranno il punto di partenza per un ulteriore studio relativo ad una valutazione in termini statistici dei benefici ottenuti sulla salute umana, in particolare la riduzione delle patologie dell'apparato cardiorespiratorio e delle patologie oncologiche connesse alla diminuzione degli inquinanti immessi in atmosfera (CO, SO_x, NO_x, POLVERI). Il passo successivo sarà la valutazione dei costi evitati a carico della collettività, del sistema produttivo e del sistema sanitario nazionale in conseguenza della riduzione delle suddette patologie. Per tale obiettivo si utilizzerà il metodo definito indiretto della relazione dose-risposta che si articola principalmente in due fasi: una fase iniziale in cui si stimano gli effetti fisici dell'inquinamento atmosferico sulla salute ed una seconda fase in cui si esprimono tali effetti in termini monetari.

6. ELENCO DEI SIMBOLI

E_i	Emissioni di un generico macroinquinante i [t/anno]
VF	Volume complessivo dei fumi emessi [Nm^3/anno]
C_i	Concentrazione media del generico inquinante [mg/Nm^3]
VF_{SP}	Volume fumi emessi per kg di combustile bruciato [Nm^3/kg]
C	Carbonio contenuto in un kg di combustibile [kg]
H_2	Idrogeno contenuto in un kg di combustibile [kg]
S	Zolfo contenuto in un kg di combustibile [kg]
N_2	Azoto contenuto in un kg di combustibile [kg]
O_2	Ossigeno contenuto in un kg di combustibile [kg]
Ei_{CP}	Emissioni annue del generico inquinante i alla capacità produttiva[t/anno]
VLi	Limite autorizzato/proposto per l'inquinante i [mg/Nm^3]
VF_{CP}	Volume dei fumi alla capacità produttiva [Nm^3/h]
H	Ore di funzionamento annuale [h/anno].

7. BIBLIOGRAFIA

1. Allegato tecnico al regolamento recante le norme di applicazione della tassa sulle emissioni di anidride solforosa (SO_2) e di ossidi di azoto (NO_x). – Art. 17, commi dal 29 al 33, della legge 27/12/97, n°449;
2. Decreto Legislativo 18 febbraio 2005, n. 59 Attuazione integrale della direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento;
3. Lombard, P.L. e Molocchi, A. (1998) "I costi ambientali e sociali della mobilità in Italia" Franco Angeli, Milano;
4. Cotana F. e Marcucci E., (2000) "Evaluating external transport costs of noise in an Italian region: the case of Umbria" in L. Sucharov & C.A. Brebbia, WIT press, Southampton, Boston.

EMISSIONI DI POLVERI ULTRAFINI NEI PROCESSI DI COTTURA: FATTORI DI EMISSIONE E ANALISI DELLA VOLATILITÀ

Giorgio Buonanno[1], Luca Stabile[1], Agostino Viola[2]

[1]DiMSAT - Università degli Studi di Cassino, (FR), [2]Pa.L.Mer. scarl, Ferentino (FR)

SOMMARIO

Studi epidemiologici e tossicologici hanno rilevato possibili effetti nocivi sulle persone esposte ad elevate concentrazioni di polveri. In particolare, negli ultimi anni, la comunità scientifica ha spostato l'attenzione da concentrazioni di poveri in massa (PM_{10} e $PM_{2.5}$) verso le concentrazioni di particelle in numero e, quindi, dalle polveri grossolane alle particelle ultrafini (UFP).

Oltre alla caratterizzazione di concentrazioni di polveri in ambienti outdoor, negli ultimi anni sono stati prodotti molteplici studi in tema di esposizione alle emissioni di particelle in ambienti indoor dove i processi di cottura sono la principale sorgente emissiva.

Nel presente lavoro è stata analizzata l'emissione di polveri, in termini di fattore di emissione, da due tipici metodi di cottura della cucina occidentale: l'arrostitura (*grilling*) e la frittura (*frying*). La caratterizzazione di tale sorgente emissiva è stata effettuata anche valutando l'influenza di parametri caratteristici quali la temperatura di cottura, la tipologia di cibo, il tipo di olio e il tipo di alimentazione del fornello. Inoltre, è stata condotta un'analisi sperimentale volta a determinare la volatilità delle particelle al fine di valutare la riduzione dimensionale e l'eventuale presenza di un nucleo solido delle polveri emesse in funzione del metodo di cottura (*grilling* o *frying*) e di cibo esaminato.

INTRODUZIONE

Nell'ambito della vasta problematica dell'inquinamento atmosferico, grossa rilevanza sta assumendo negli ultimi anni l'inquinamento da polveri. Recenti scoperte in campo scientifico e tossicologico hanno, infatti, evidenziato effetti nocivi delle emissioni di polveri sulla salute umana (problemi respiratori e cardiovascolari, aumento del tasso di mortalità) [1]. In realtà, non c'è ancora unanime accordo nella comunità scientifica su quale tipo o taglia di particelle possa causare conseguenze più dannose alla salute dell'uomo. Parte di questi studi documentano che gli effetti nocivi dipendono principalmente dalla concentrazione in massa delle polveri: "particolato fine" ($PM_{2.5}$) [2] e "particolato grossolano" (PM_{10}) [3], al contrario, altri studi mostrano come i problemi alle funzioni polmonari siano meglio correlati alla concentrazione in numero di particelle ultrafini (UFP) [4] o al tasso di assunzione [5]. Le nuove frontiere della ricerca in campo epidemiologico e tecnico-scientifico hanno indotto a ridefinire, nel tempo, gli standard di qualità dell'aria spostando l'interesse dei legislatori dalle polveri totali sospese (PTS) alle grossolane (PM_{10}) e, probabilmente, in un futuro ormai prossimo, dalle fini ($PM_{2.5}$) [6,7] alle ultrafini (UFP).

Negli ultimi anni, accanto alla caratterizzazione di polveri nelle aree urbane, sono stati prodotti molteplici studi sperimentali in tema di esposizione delle persone alle emissioni di particelle in ambienti indoor. In molti paesi, infatti, la popolazione trascorre la maggior parte del proprio tempo in ambienti indoor dove, processi di cottura, riscaldamento, fumo di sigaretta e fenomeni di combustione in generale, determinano notevoli emissioni di particelle fini ed UFP [8]. Molti di questi studi sono incentrati sulla stima delle emissioni di polveri, espresse in fattori di emissione (particelle/min), da processi di cottura in diverse abitazioni tenendo conto delle differenti condizioni di ventilazione del locale [9-14].

Nel presente lavoro è stata analizzata l'emissione di polveri da due tipici metodi di cottura della cucina occidentale: l'arrostitura (*grilling*) e la frittura (*frying*) valutando l'influenza di diversi parametri quali la temperatura, il cibo, il tipo di olio e il tipo di alimentazione del fornello. Un'ulteriore attività sperimentale è stata condotta in termini di volatilità delle particelle. L'utilizzo di un sistema di termo-diluizione e condizionamento dell'aerosol campionato ha permesso di valutare le differenti distribuzioni dimensionali e concentrazioni totali in termini di numero di particelle al variare della temperatura di condizionamento dell'aerosol. Tale analisi è stata condotta al fine di valutare la riduzione dimensionale e l'eventuale presenza di un nucleo solido delle particelle emesse in funzione del metodo di cottura (*grilling* o *frying*) e di cibo esaminato (grassi o vegetali).

ANALISI SPERIMENTALE

Procedura di misura

La determinazione del livello di concentrazione di particelle in ambienti indoor è espressa in termini di *fattore di emissione* (*EF*) la cui valutazione è ottenuta mediante la relazione [12, 15-17]:

$$EF = V \cdot \left[\frac{C_{in} - C_{in,0}}{\Delta t} + \left(\overline{AER + k} \right) \cdot \overline{C_{in}} - AER \cdot C_{in,0} \right] \qquad (1)$$

dove C_{in} e $C_{in,0}$ sono, rispettivamente, i valori di picco ed iniziale della concentrazione di polveri indoor, *AER* è il coefficiente di ricambio d'aria nell'ambiente monitorato, *k* è il coefficiente di deposizione, $\overline{AER + k}$ è il coefficiente di rimozione totale medio, Δt è l'intervallo di tempo tra la concentrazione iniziale (C_{in}) e quella di picco ($C_{in,0}$), *t* è il tempo e *V* è il volume dell'ambiente.

Tale metodologia di calcolo è stata applicata nella valutazione dei fattori di emissione del *grilling* e del *frying* per diverse tipologie di cibi, temperature di cottura e tipo di alimentazione (gas o elettrica) seguendo una procedura che prevede: la misura dei valori di fondo della concentrazione di particelle (5 min con fonte di emissione spenta), la misura durante l'attività di cucina e, infine, la misura per i seguenti 30-40 min a partire dallo spegnimento della sorgente. Le misure sono state effettuate a 2 m di distanza dal fornello.

Sito di campionamento

La campagna sperimentale è stata condotta nel periodo Maggio-Settembre 2008 nel Laboratorio di Misure Ambientali dell'Università di Cassino (locale di 80 m^2 e altezza 2.8 m) utilizzando una cucina domestica con fornelli a gas ed elettrici. Sono state valutate due differenti condizioni di ventilazione del locale: ventilazione minima (porte e finestre chiuse) e normale (aerazione meccanica in funzione).

Strumentazione di misura

La concentrazione in numero e la distribuzione dimensionale delle particelle è stata misurata mediante Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS 3936, TSI Inc., St. Paul, MN) e Aerodynamic Particle Sizer (APS 3321, TSI Inc., St. Paul, MN). Il principio di misura di tale strumentazione si basa sul conteggio delle particelle opportunamente classificate in differenti taglie dimensionali [18] da cui si ottiene la distribuzione dimensionale e la concentrazione totale in numero di particelle, area superficiale e volume nel range dimensionale 0.0059 - 20 μm. Tale strumentazione permette, inoltre, di stimare la concentrazione totale e la distribuzione di particelle in termini di massa sulla base della stima di un valore di densità, qui ipotizzato costante e pari a 1.7 g/cm^3 secondo i dati di letteratura [19,20].

Al fine di monitorare la temperatura raggiunta nella cottura dei cibi, è stata utilizzata una termocamera ad infrarosso FLIR System ThermaCAM™ S45 [21]. Il monitoraggio delle differenti condizione di ventilazione del locale è stato effettuato mediante un IAQ-CALC™ (TSI Model 7515) in grado di misurare il tasso di ricambio d'aria (*AER*) sulla base della stima del decadimento di CO_2 [12]. In particolare i valori di *AER* ottenuti sono stati, rispettivamente, 0.29±0.05 h^{-1} nel caso di ventilazione minima e 0.89±0.11 h^{-1} per ventilazione normale del locale.

Un sistema di termo diluzione e condizionamento termico dell'aerosol campionato, costituito da un Rotating Disk Thermodiluter (Matter Engineering AG) ed un Thermal Conditioner (Matter Engineering AG), è stato accoppiato allo SMPS al fine di caratterizzare la volatilità delle particelle prodotte da processi di cottura. Variando la temperatura di condizionamento termico dell'aerosol è stata valutata la variazione della distribuzione dimensionale e della concentrazione totale di particelle nel caso di cottura di cibi sia grassi che vegetali.

RISULTATI DI MISURA

Caratterizzazione della sorgente nel *grilling*

In Tabella 1 sono riportati i fattori di emissione (NEF) e i picchi di concentrazione (NPV) della distribuzione in numero di particelle al fine di caratterizzare le emissioni delle diverse sorgenti di cottura. In particolare sono state effettuate: una prova a vuoto nel caso di alimentazione a gas e prove di *grilling* su piastra (senza cibo) con alimentazione a gas (fornello regolato alla massima e minima potenza) ed elettrica (fornello impostato alla temperatura massima e minima). Dai risultati si nota che, a parità di tipologia di alimentazione, le emissioni aumentano di un ordine di grandezza passando dal valore di temperatura minimo a quello massimo. A parità di alimentazione (gas) e temperatura (potenza massima) la concentrazione totale è maggiore nel caso di *grilling* su piastra rispetto alla prova a vuoto. Si nota, infine, che le emissioni nel caso di alimentazione a gas sono maggiori rispetto a quelle con alimentazione elettrica.

Tabella 1: Fattori di emissione in numero (NEF) e valore di picco della distribuzione in numero (NPV).

Tipo di prova	NEF (part/min)	NPV ($part/cm^3$)	Temperatura media della piastra a fine cottura (°C)
Fornello a gas (potenza max)	$2.1±0.1×10^{12}$	$9.5±2.1×10^{4}$	prova a vuoto
Grilling a gas (potenza max)	$3.0×10^{12}$	$1.5×10^{5}$	325±26
Grilling a gas (potenza min)	$1.2×10^{11}$	$1.7×10^{4}$	37±1.0
Grilling elettrico (temperatura max)	$1.3×10^{12}$	$9.4×10^{4}$	246±7
Grilling elettrico (temperatura min)	$2.9×10^{11}$	$2.6×10^{4}$	178±10

Influenza della tipologia di cibo

Al fine di valutare l'influenza del tipo di cibo sulle emissioni, in Tabella 2 sono riportati i fattori di emissione per le distribuzioni in numero, area superficiale e massa dell'aerosol prodotto per *grilling* a gas (fornello alla potenza massima) di: formaggio (scamorza), wurstel (carne di maiale), pancetta e melanzane.

Tabella 2: Caratterizzazione dell'aerosol generato da *grilling* di formaggio, wurstel, pancetta e melanzane: fattori di emissione (EF), valori di picco della distribuzione (PV) e diametro modale (MD) per distribuzioni in numero (N), area superficiale (S) e massa (M).

	Formaggio	Wurstel	Pancetta	Melanzane
NEF (part/min)	$3.4×10^{12}$	$3.1×10^{12}$	$2.8×10^{12}$	$2.6×10^{12}$
SEF ($μm^2/min$)	$3.4×10^{12}$	$3.1×10^{12}$	$2.8×10^{12}$	$2.6×10^{12}$
MEF (μg/min)	$9.5×10^{3}$	$1.0×10^{4}$	$4.7×10^{3}$	$8.9×10^{2}$
NPV ($part/cm^3$)	$1.1×10^{5}$	$1.3×10^{5}$	$1.0×10^{5}$	$1.2×10^{5}$
SPV (nm^2/cm^3)	$4.6×10^{9}$	$5.8×10^{9}$	$9.8×10^{9}$	$2.8×10^{9}$
MPV ($μg/m^3$)	383	452	236	78
NMD (nm)	41	43	49	29

I dati di misura mostrano che le emissioni da cibi grassi sono significativamente più alte rispetto a quelle da vegetali. In Figura 1 sono, inoltre, riportate le distribuzioni dimensionali ottenute per le quattro tipologie di cibo analizzate: la moda della distribuzione per cibi grassi varia tra 40 e 50 nm, nel caso di vegetali, invece, è posta a circa 30 nm.

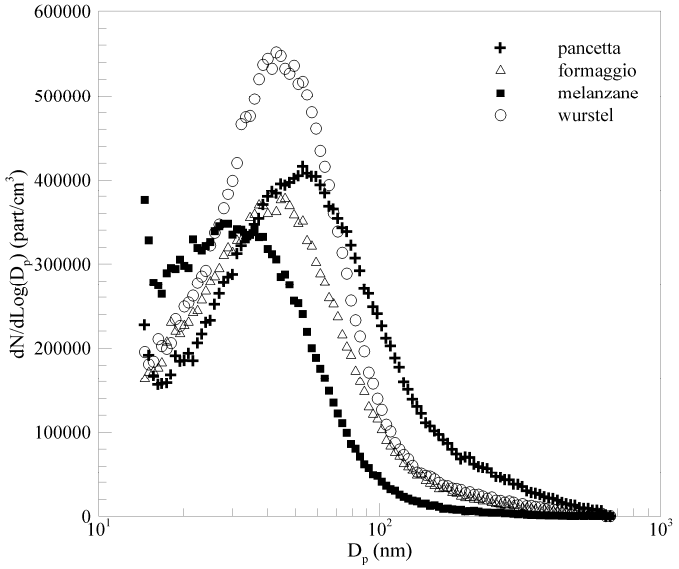


Figura 1: Distribuzione dimensionale dell'aerosol generato nel *grilling* a gas al variare del tipo di cibo.

Influenza della temperatura

In Tabella 3 sono riportati i fattori di emissione delle distribuzioni in numero, area superficiale e massa nel *grilling* a gas di 50 g di pancetta al variare della regolazione nell'erogazione di gas del fornello (potenza massima e minima) e, quindi, della temperatura. La temperatura media della piastra misurata nei due casi è stata di 242±5.2 °C (potenza massima del fornello) e 171±17 °C (potenza minima). In particolare, in Figura 2 è riportato il campo di temperatura della piastra rilevata mediante FLIR System ThermaCAM™ S45 nel caso di fornello a potenza massima.

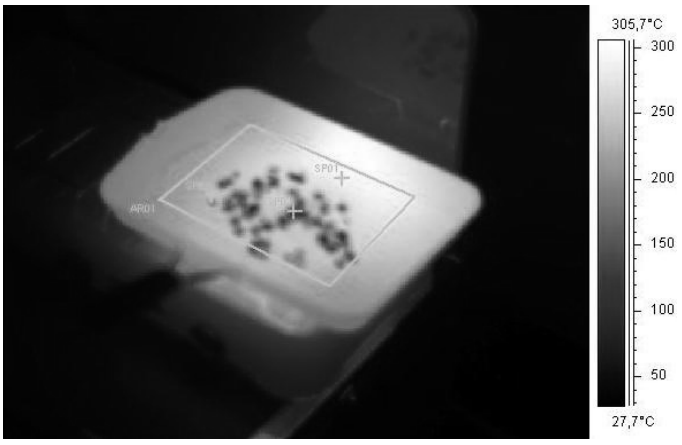


Figura 2: Campo di temperatura sulla piastra durante il *grilling* a gas (massima potenza) di pancetta rilevata mediante FLIR System ThermaCAM™ S45. La temperatura media misurata è stata di 242±5.2 °C.

La stima dei fattori di emissione mostra una forte influenza della temperatura. In particolare, il rapporto dei fattori di emissioni nelle due condizioni di alimentazione (potenza massima e minima), dimostra una preponderante influenza della temperatura nel caso di emissioni in termini di area superficiale e massa.

Tabella 3: Fattori di emissione (NEF, SEF, MEF) nel *grilling* a gas di 50 g pancetta al variare della temperatura e quindi della potenza del fornello: massima potenza, minima potenza e rapporto massima/minima potenza.

	Massima potenza	Minima potenza	Rapporto tra i fattori di emissione misurati nelle condizioni di massima e minima potenza
NEF (part/min)	2.5×10^{12}	1.5×10^{12}	1.7
SEF (μm^2/min)	2.6×10^{5}	3.3×10^{4}	7.9
MEF (µg/min)	4.7×10^{3}	3.9×10^{2}	12

Influenza del tipo di olio nella frittura a gas

In Tabella 4 sono riportati i fattori di emissione per le distribuzioni in numero, area superficiale e massa dell'aerosol prodotto da *frying* a gas (fornello alla potenza massima) di 50 g di patatine al variare del tipo di olio utilizzato: olio di oliva, olio di arachidi e olio di girasole (specifico per frittura). I livelli di emissione più elevati sono stati rilevati nel caso di olio di oliva, testimoniandone la non adeguatezza per la frittura. Al contrario, l'olio di girasole (specifico per fritture) mostra le emissioni più basse (circa metà di quelle da olio d'oliva) confermando il vantaggio dell'utilizzo di questo tipo di olio in termini di emissioni.

Tabella 4: Caratterizzazione dell'aerosol generato da frying a gas (massima potenza) di 50 g di patatine: fattori di emissione (EF), valori di picco della distribuzione (PV) e diametro modale (MD) per distribuzioni in numero (N), area superficiale (S) e massa (M).

	Olio di oliva	Olio di arachidi	Olio di girasole
NEF (part/min)	1.8×10^{12}	2.3×10^{12}	1.1×10^{12}
SEF (μm^2/min)	2.5×10^{5}	1.6×10^{5}	1.2×10^{5}
MEF (µg/min)	3.3×10^{3}	1.6×10^{3}	1.2×10^{3}
NPV (part/cm^3)	1.2×10^{5}	1.2×10^{5}	1.1×10^{5}
SPV (nm^2/cm^3)	1.1×10^{10}	6.8×10^{9}	6.0×10^{9}
MPV (µg/m^3)	128	68	60
NMD (nm)	61.5	49.6	49.6

Analisi della volatilità

L'analisi della volatilità dell'aerosol è stata condotta mediante un Rotating Disk Thermodiluter (Matter Engineering AG) ed un Thermal Conditioner (Matter Engineering AG). Tali dispositivi permettono di riscaldare l'aerosol campionato fino a 300 °C (condizionamento termico dell'aerosol) eliminando, in tal modo, tutte le specie volatili alla temperatura fissata. La portata di aerosol epurata della parte volatile è inviata allo SMPS 3936 da cui si ottiene la distribuzione dimensionale in numero, e la relativa concentrazione totale, di particelle alla temperatura di condizionamento impostata. In Figura 3 è riportato il decadimento della moda al variare della temperatura di condizionamento del Thermal Conditioner per frittura e

grilling. Tale decadimento è indicato in termini di diminuzione percentuale del diametro di picco (moda), ΔD. Nel caso di frittura si osserva un decadimento fino a 250 °C sia per cottura di vegetali che di grassi, mentre, nel caso di vegetali, tale decadimento si manifesta anche oltre i 300 °C.

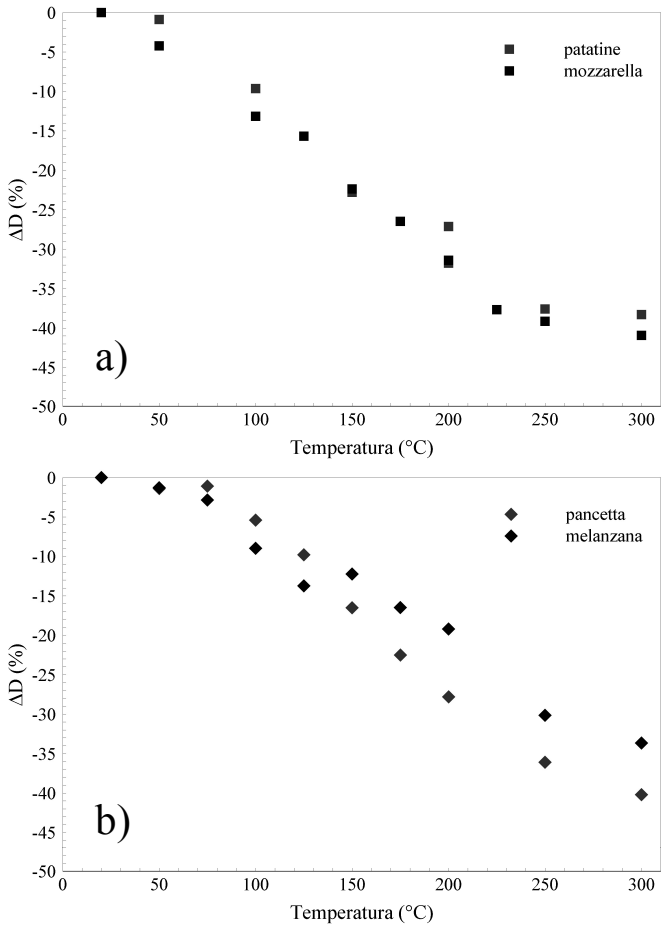


Figura 3: Decadimento percentuale della moda delle distribuzioni misurate a differenti temperature di condizionamento nel caso di a) frittura e b) *grilling*.

L'influenza della temperatura di condizionamento è mostrata anche in termini di distribuzione dimensionale. In Figura 4 sono riportate le distribuzioni dimensionali ottenute a seguito della cottura (*frying* o *grilling*) di cibi grassi e vegetali condizionando (a 300 °C) o meno l'aerosol campionato.

Le curve misurate sembrerebbero dimostrare la presenza di un nucleo solido per entrambi i metodi di cottura nel caso di cibi grassi, infatti, le curve relative alla cottura di mozzarella e pancetta traslano verso diametri minori a causa dell'evaporazione della fase condensata presente sul nucleo. Le curve relative, invece, ai cibi vegetali presentano anche un abbassamento tipico di una diminuzione della concentrazione delle particelle a seguito del condizionamento termico, in tal caso, quindi, parte dell'aerosol prodotto dai fenomeni di cottura non presenta un nucleo solido ma, al contrario, è costituito da particelle ad elevata volatilità.

Tali differenze di volatilità tra particelle emesse da differenti tipologie di cibo possono essere interessanti dal punto di vista della valutazione dell'esposizione della popolazione alle polveri in ambienti sede di processi di cottura.

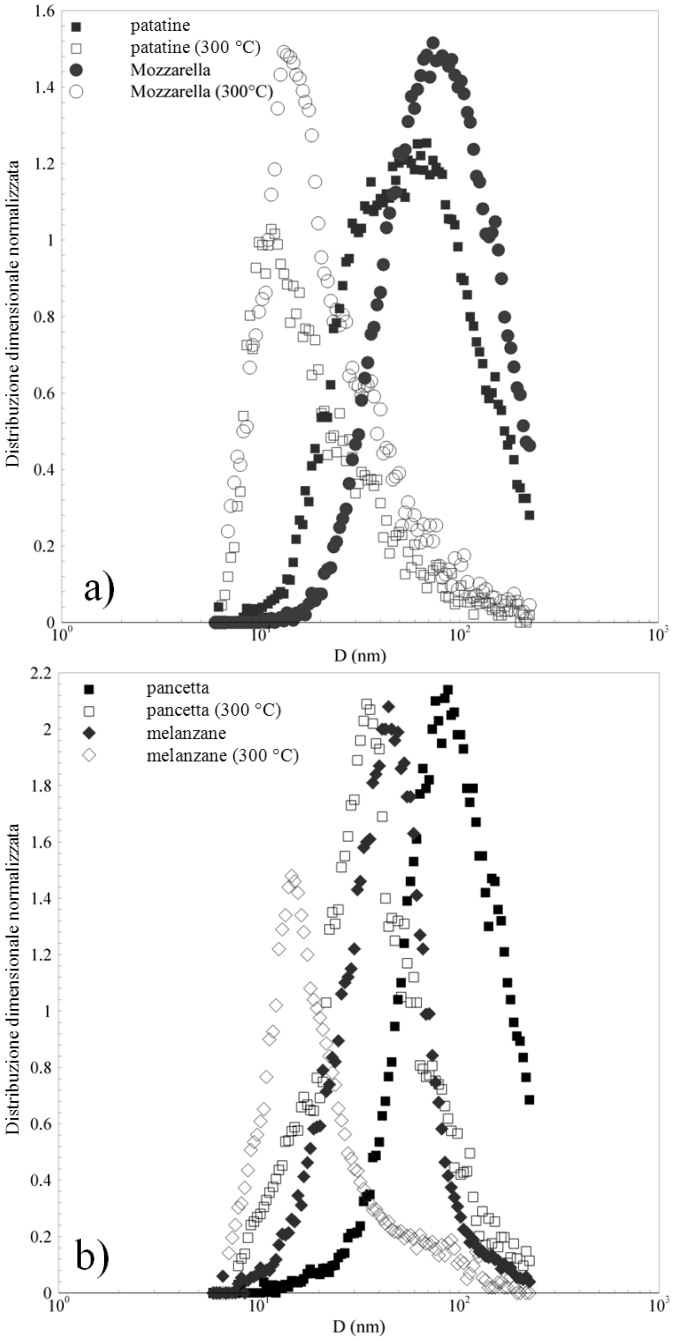


Figura 4: Distribuzione dimensionale delle particelle con (300 °C) e senza condizionamento termico dell'aerosol per a) *frying* e b) *grilling*

CONCLUSIONI

Lo studio propone un'analisi sperimentale volta a caratterizzare le emissioni di particelle da processi di cottura (*grilling* e *frying*) in funzione dei diversi parametri d'influenza.

Le misure effettuate per la caratterizzazione della sorgente di cottura nel caso di *grilling*, mostrano una maggiore emissione nel caso di alimentazione a gas rispetto a quella elettrica.

L'analisi sull'influenza della tipologia di cibo mostra una maggiore emissione di particelle dei cibi grassi rispetto a quelli vegetali.

L'analisi dell'influenza della temperatura evidenzia un aumento delle emissioni all'aumentare della temperatura di cottura, tale differenza è considerevole in termini di area superficiale e massa.

Lo studio dell'influenza dell'olio sul processo di frittura a gas, rivela che l'utilizzo di un olio specifico per la frittura (olio di girasole) esibisce fattori di emissione più bassi rispetto alle altre tipologie di oli, in particolare, l'olio d'oliva risulta quello meno adatto per la frittura.

L'analisi della volatilità delle particelle, infine, ha mostrato un differente comportamento tra gli aerosol prodotti a seguito della cottura di cibi grassi e vegetali, in particolare, i cibi grassi presentano un *core* solido non sempre presente nel caso di cibi vegetali.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Kreyling, W.G., Semmler-Behnke M., Moller W., 2006. Health implications of nanoparticles. Journal of Nanoparticle Research 8, 543–562.
2. Pope, C.A., 2000. What do epidemiologic findings tell us about health effects of environmental aerosols? J. Aerosol Med. 13, 335-354.
3. Loomis, D., 2000. Sizing up air pollution research. Epidemiology 11, 2-4.
4. Hauser, R., Godleski, J.J., Hatch, V., Christiani, D.C., 2001. Ultrafine particles in human lung macrophages, Arch. Environ. Health 56, 150-156.
5. Siegmann, K., Siegmann, H. C., 1998. Molecular Precursors of Soot and Quantification of the Associated Health Risk. Plenum Press: New York, 143-160.
6. EN 12341, 1999. Determination of the PM10 fraction of suspended particulate matter. Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods.
7. EN 14907, 2005. Ambient air quality - Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM2.5 mass fraction of suspended particulate matter.
8. Morawska, L., Zhang, J., 2002. Combustion sources of particles: health relevance and source signatures, Chemosphere 49 (9), 1045–1058.
9. Dennekamp, M., Howarth, S., Dick, C.A., Cherrie, J.W., Donaldson, K. and Seaton, A., 2001, Ultrafine Particles and Nitrogen Oxides Generated by Gas and Electric Cooking. Occup. Environ. Med. 58: 511–516.
10. Li, C.S., Lin, W.H. and Jenq, F.T., 1993, Size Distributions of Submicrometer Aerosols from Cooking. Environ. Int. 19: 147–154.
11. See, S.W., Balasubramanian, R., 2006a. Physical Characteristics of Ultrafine Particles Emitted from Different Gas Cooking Methods, Aerosol and Air Quality Research, 6, 82-92.
12. He, C., Morawska, L., Hitchins, J., Gilbert, D., 2004. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. Atmospheric Environment 38 (21), 3405–3415.
13. Yeung L.L., To W.M., 2008, Size Distributions of the Aerosols Emitted from Commercial Cooking Processes: Indoor and Built Environment, 17:220–229.
14. Wallace, L.A., Emmerich, S.J. and Howard-Reed, C., 2004, Source Strengths of Ultrafine and Fine Particles Due to Cooking with a Gas Stove. Environ. Sci. Technol. 38: 2304–2311.
15. Chen, Y.C., Zhang, Y.H., Barber, E.M., 2000, A dynamic method to estimate indoor dust sink and source. Building and Environment 35 (3), 215–221.
16. Koutrakis, P., Briggs, S., Leaderer, B., 1992, Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga Counties, New York. Environmental Science and Technology 26, 521–527.
17. Thatcher, T.L., Layton, D.W., 1995. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. Atmospheric Environment 29, 1487–1497.
18. Baron, P.A., Willeke, K., 2001, Aerosol Measurement. John Wiley, New York.
19. Fine P.M., Shen S. and Sioutas C., 2004, Inferring the Sources of Fine and Ultrafine Particulate Matter at Downwind Receptor Sites in the Los Angeles Basin Using Multiple Continuous Measurements, Aerosol Science and Technology, vol. 38:12, pp. 182-195.
20. Sioutas C., Abt E., Wolfson J.M. and Koutrakis P., 1999, Evaluation of the Measurement Performance of the Scanning Mobility Particle Sizer and Aerodynamic Particle Sizer, Aerosol Sci. Technol., vol. 30, pp. 84–92.
21. Runciman, H.M., 1998, Thermal imaging. In "The measurement, instrumentation, and sensors handbook", Ed. J.G. Webster, CRC Press Inc., Boca Raton, FL.

RICONOSCIMENTO ALLE ASSOCIAZIONI AMBIENTALISTE DELLA LEGITTIMAZIONE AD AGIRE IN GIUDIZIO PER LA TUTELA DEL PATRIMONIO AMBIENTALE, CULTURALE, STORICO, ARTISTICO E DELL'ASSETTO DEL TERRITORIO.

Emilia Colaiuta

SSTAM - Scuola Superiore Territorio Ambiente Management
Universitàdegli Studi di Perugia - Via G. Duranti, n. 67 - 06125 Perugia

SOMMARIO

II dettato nell'articolo 18 della legge 8 luglio 1986 n.349, con cui è stato riconosciuto a determinate ambientaliste la legittimazione ad agire in giudizio per la salvaguardia dei valori ambientali, configurava all'epoca una fattispecie peculiare ed eccezionale di interesse a ricorrere correlato ad uno specifico interesse ambientale considerato in senso stretto.

La giurisprudenza del Consiglio di Stato confermò per un lungo periodo il carattere di eccezzionalità della legittimazione ad agire per le associazioni ambientaliste esclusivamente per motivi di gravame direttamente attinenti alla sfera dell'interesse tutelalo, escludendo assolutamente i motivi di valenza urbanistico-edilizia, in quanto capaci di tutelare i valori ambientali solo in via strumentale ed indiretta.

Successivamente al giudice fu riconosciuto il potere di interprete in senso più lato la nozione di "tutela degli interessi ambientali" che comprese anche la salvaguardia dei valori storici, artistici e paesaggistici purché funzionali al soddisfacimento di uno specifico interesse ambientale.

L'articolo 309 del dlgs del 3 aprile 2006 n.152, recepita la necessita di adeguare la normativa nazionale alle effettive esigenze del Paese e di attuare una più adeguata protezione ambientale unagliore salvaguardia del territorio, ha riconosciuto, tra l'altro, il diritto di inytervenire in via autonoma e principale nei giudizi per danno ambientale e di ricorrere in sede di giurisdizione amministrativa per l'annullamento di atti illegittimi alle persone fisiche e giuridiche nonché alle associazioni di protezione ambientale, anche non riconosciute dal Ministero dell'ambiente, nella loro qualità di soggetti portatori di un interesse differenziato alla tutela degli interessi ambientali.

L'argomento è di notevole e attuale importanzaperchè la legittimazione ad agire riconosciuta alle varie associazioni costituite a difesa dell'ambiente contribuisce a tutelare non interessi diffusi ed astratti, bensì interessi collettivi legittimi connessi alla conservazione e valorizzazione in genere ed, in particolare, anche del paesaggio urbano, rurale e naturale.

LA PROBLEMATICA SULLE ASSOCIAZIONI AMBIENTALISTE

La complessa problematica in materia di legittimazione attiva e di tutela risarcitoria contro i danni causati all'ambiente è stata affrontata e risolta dalle disposizioni normative dell'articolo 309 comma 1 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n.152, con cui è stato abrogato l'articolo 18 della legge 8 luglio 1986, n.349, e con cui è stato previsto l'intervento statale sulle richieste avanzate da parte delle regioni, delle province autonome e degli enti locali, anche associati, nonché delle persone fisiche o giuridiche che siano o potrebbero in futuro essere colpite da un evento di danno ambientale, ovvero che siano titolari di un interesse che legittimi la loro partecipazione al procedimento relativo alla adozione delle misure di precauzione, di prevenzione o di ripristino previste dalla parte sesta del decreto in questione. Al comma 2 del medesimo articolo è stata riconosciuta, inoltre, la titolarità dell'interesse di cui al precedente comma 1 ed il potere di promuovere la protezione dell'ambiente anche alle organizzazioni ambientaliste non governative e prive del riconoscimento previsto dall'articolo 13 della riportata legge n.349/1986.

Il pregio del contenuto del testo del decreto legislativo n.152/2006 consiste essenzialmente nell'aver confermato le precedenti pronunce giurisprudenziali che hanno consolidato l'orientamento di riconoscere il diritto alla tutela della salute e, di conseguenza all'ambiente, nei confronti di tutti gli enti territoriali e locali e nei confronti della persona umana, non solo con riferimento alla propria dimensione individuale, bensì anche a quella sociale, estendendo la legittimazione ad agire in giudizio a quanti siano stati effettivamente danneggiati ovvero potrebbero subire in futuro conseguenze a seguito di fatti, atti e reati perpetrati in violazione di leggi ambientali.

La innovazione apportata dal testo del suddetto decreto legislativo, confermata in seguito anche dalle successive norme che l'hanno in parte modificato, ha riguardato l'eliminazione e la modifica di alcuni requisiti previsti dalle precedenti disposizioni normative che, in qualche caso, rappresentavano addirittura ostacolo ovvero impedimento per l'attuazione della completa tutela del soggetto danneggiato e spesso non consentivano di soddisfare il diritto ad ottenere non solo il giusto risarcimento per i danni ma, soprattutto, ad attuare una effettiva azione di prevenzione, salvaguardia e tutela del patrimonio ambientale, culturale, storico ed artistico della Nazione.

ASPETTI NORMATIVI

Al fine di individuare e valutare le modifiche di questi requisiti, occorre analizzare brevemente l'intero quadro normativo che ha risentito fortemente della evoluzione intervenuta nei rapporti tra pubblica amministrazione ed amministrati.

La tutela specifica dell'ambiente fu disciplinata per la prima

volta in occasione della emanazione della legge 349/1986 che, all'articolo 18, ha previsto l'obbligo di risarcimento del danno per "l'autore di qualunque fatto doloso o colposo in violazione di leggi o provvedimenti adottati in base a legge che compromette l'ambiente, ad esso arrecando un danno, alterandolo, deteriorandolo, distruggendolo in tutto o in parte". Anche se il testo ha contemplato espressamente l'obbligo del risarcimento del danno per il pregiudizio arrecato all'ambiente, raramente all'epoca si riusciva ad assicurare la piena tutela degli interessi ambientali ed a punire il soggetto responsabile del danno ambientale, in quanto l'articolo 18, al fine della considerazione e valutazione dell'evento del danno, richiedeva la verifica della sussistenza sia del nesso eziologico tra condotta e pregiudizio, sia dell'elemento soggettivo, consistente nella condotta dolosa o colposa correlata obbligatoriamente a specifica violazione di disposizione di legge o provvedimenti adottati in base a prescrizione di legge, con l'onere per il soggetto danneggiato di fornire la prova dell'effettivo pregiudizio ambientale che aveva causato la alterazione, il deterioramento e la distruzione in tutto o in parte del territorio.

In effetti, i problemi furono avvertiti immediatamente poichè la applicazione del testo normativo non permetteva sempre di punire l'autore del fatto dannoso, in quanto era davvero difficile dimostrare che lo stesso aveva agito con l'elemento psicologico intenzionale ravvisabile nel dolo o nella colpa specifica, correlato a mera condotta tipica rinvenibile ad attività illegittima. Anche l'effettivo pregiudizio all'ambiente non era facilmente ed immediatamente individuabile, in quanto gli effetti dannosi sull'ambiente in alcuni casi si possono manifestare addirittura anche a distanza di molti decenni dalla data della realizzazione del fatto, con conseguente impossibilità per il danneggiato di fornire la richiesta prova del nesso di causalità e di quantificare immediatamente il valore del danno.

La Corte Costituzionale con sentenze n.210 del 22 maggio 1987 e n.641 del 30 dicembre 1987 intervenne sulla questione, fornendo un autorevole contributo sul significato della nozione di ambiente che fu definito quale bene pubblico sotteso al soddisfacimento di interessi pubblici e, quindi, riferito al diritto fondamentale della collettività.

Successivamente il legislatore mediante l'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n.22, in materia di bonifica, introdusse elementi di novità, stabilendo che l'autore del fatto, anche se commesso in modo accidentale, rimaneva comunque responsabile non solo per i danni effettivamente causati, ma anche per i fatti determinanti pericolo attuale e concreto per il superamento dei limiti tabellari, con obbligo di procedere a proprie spese per gli interventi di messa in sicurezza, bonifica e ripristino ambientale delle aree inquinate e degli impianti dai quali sarebbe potuto derivare l'eventuale pericolo di inquinamento. La responsabilità per danno ambientale è, quindi, da questo momento svincolata dal precedente ed esclusivo criterio di accertato fatto colposo o di doloso, essendo ora correlata anche al pericolo concreto ed attuale di inquinamento ambientale.

L'articolo 58 del decreto legislativo 11 maggio 1999, n.152, in materia di tutela delle acque dall'inquinamento, confermò questo indirizzo e ribadì, altresì, l'obbligo di provvedere a proprie spese per gli interventi di risanamento ambientale senza la sussistenza del presupposto formale del superamento dei limiti di accettabilità, essendo solo richiesto il nesso eziologico tra condotta attiva od omissiva riconducibile a violazione di disposizioni normative.

L'articolo 309 del successivo decreto legislativo 3 aprile 2006, n.152, ha definito il concetto di danno ambientale quale lesione del diritto fondamentale di ogni individuo all'ambiente salubre e quale offesa alla persona umana nella sua dimensione sia individuale che sociale, eliminando così la barriera posta dal precedente testo dell'articolo 18 della legge 349/1986 che annoverava tra i soggetti legittimati all'azione di risarcimento del danno ambientale e per l'annullamento degli atti illegittimi, oltre allo Stato, agli enti pubblici, ai singoli cittadini, le sole associazioni ambientaliste a carattere nazionale e presenti in almeno cinque regioni ed individuate mediante decreto del Ministro dell'Ambiente.

Chiaramente si evince che la precedente definizione era limitativa rispetto al termine "persone fisiche" indicato nell'articolo 309 del decreto legislativo n. 152/2006 che riconosce a tutte le collettività aventi interessi ambientali lo status ed il diritto esperibile erga omnes, al pari di tutte le altre persone fisiche, in quanto munite di personalità e capacità giuridica, con attitudine a diventare titolari di situazioni, di poteri, di diritti e di doveri giuridici. In vigenza della legge 349/1986, la giurisprudenza del Consiglio di Stato confermò il carattere di eccezionalità della legittimazione ad agire delle associazioni ambientaliste che potevano proporre in giudizio solo motivi di gravame direttamente attinenti alla sfera dell'interesse tutelato, escludendo i motivi di valenza urbanistico-edilizia, che solo in via strumentale ed indiretta erano collegati alla tutela dei valori ambientali. In seguito, l'indirizzo giurisprudenziale conferì una interpretazione in senso lato alla nozione di interesse ambientale, comprendendovi anche la salvaguardia di valori connessi al paesaggio urbano, rurale e naturale, dei monumenti e dei beni culturali, purchè funzionali al soddisfacimento di uno specifico interesse ambientale.

Il diritto di agire o di costituirsi parte civile nei giudizi per danni ambientali, anche senza il consenso del soggetto costituito, è ora riconosciuto anche alle associazioni ambientaliste quando si ipotizzi il pericolo della lesione del diritto alla salubrità dell'ambiente in considerazione della circostanza della avvertita necessità di consentire la partecipazione del cittadino alla azione della amministrazione pubblica non esclusivamente nella sua posizione individualista, ma anche quale componente di una collettività e, quindi, quale portatore di interessi legittimi generali, diffusi e partecipativi. In particolare, nei procedimenti giudiziari per la salvaguardia dell'ambiente a tutte le organizzazioni o gruppi ambientalisti è riconosciuto il ruolo attivo di soggetto titolare di diritti soggettivi pubblici che sono considerati strumentali al conseguimento dei diritti sociali costituzionalmente riconosciuti.

LO SCENARIO ATTUALE ALLA LUCE DEL QUADRO GENERALE DELLA RIFORMA

Questa attribuzione in sede processuale di speciale titolarità per gli organismi associativi in materia ambientale rientra nel quadro generale di riforma che ha riguardato non solo i procedimenti giudiziari, ma soprattutto la nuova considerazione del soggetto "pubblica amministrazione" che, pur conservando la sua prerogativa autorevolezza nei confronti della collettività, ha subito il cambiamento sostanziale apportato dalla legge 7 agosto 1990, n.241, con cui è stata attuata la trasformazione del rigido connotato della imperatività e della autorietarità della potestà provvedimentale in un concetto di pubblica amministrazione allargata che dà spazio agli interessi partecipativi degli amministrati. In effetti,

il fenomeno di riconoscimento della titolarità del diritto che legittima la proposizione di azione giurisdizionale è strettamente collegato alla prospettiva sostanzialistica cui si è ispirato il legislatore per valutare gli interessi della collettività che è portatrice di interessi qualificati prevalenti rispetto a quelli del singolo cittadino.

Il ruolo delle forze sociali è stato rafforzato anche in ossequio ai principi guida contenuti nella Agenda XXI approvata in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite su ambiente e sviluppo svoltasi a Rio de Janeiro nel mese di giugno 1992. Nel documento programmatico l'attività di tutte le associazioni ambientaliste, indipendentemente dal riconoscimento governativo, è stata considerata determinante nel processo di sviluppo delle politiche e delle strategie europee per attuare una concreta protezione dell'ambiente ed una puntuale realizzazione dei programmi di sviluppo sostenibile.

Al cittadino è, quindi, oggi riconosciuto il diritto di partecipare attivamente alla attività della pubblica amministrazione con una posizione non più di soggetto passivo nei riguardi della stessa, ma quale portatore di pieno diritto di partecipare alle scelte che lo riguardano, scelte che spesso trovano un coinvolgimento ed una soluzione nelle aule giudiziarie dove, prima della emanazione del richiamato decreto legislativo n.152/ 2006, al soggetto privato era consentito accedervi solo ed esclusivamente quale titolare di un interesse personale, diretto e concreto e non come componente di una collettività che, nonostante identificasse i propri interessi in una associazione ambientalista, non rientrava tra le figure contemplate dall' abrogato articolo 18 della legge 349/1986.

Vero è che, nel rispetto delle disposizioni contenute nel richiamato articolo 18, per un lungo periodo a tutte le altre associazioni ambientaliste prive degli specifici requisiti normativi non fu concessa la legittimazione ad agire in giudizio, nonostante fossero portatrici di interessi per la tutela di situazioni giuridiche collegate ad aspetti ambientali. Dopo un ventennio, mediante il decreto legislativo n.152/2006 e le successive modifiche ad esso apportate, si è provveduto a conferire a tutte le associazioni ambientaliste la legittimazione ad intervenire nei giudizi in via autonoma e principale, rispettando in tal modo l'orientamento legislativo e giurisprudenziale e dando concreta attuazione alle disposizioni contenute negli articoli 2, 3, 9, 18, 24, 32, 101 della Costituzione della Repubblica Italiana, posti a tutela del diritto della pari dignità sociale, della uguaglianza davanti alla legge e della garanzia dei diritti inviolabili riconosciuti all'uomo non solo come espressione della sua posizione di singolo individuo, ma anche come soggetto di formazioni sociali.

La compiuta legittimazione, con cui è stata attribuita titolarità e garanzia nei confronti di chiunque abbia interesse per la tutela di situazioni giuridiche connesse alla difesa del diritto di ottenere la tutela del paesaggio e del patrimonio storico ed artistico della Nazione completa il panorama della politica ambientale organica e sistematica che la Nazione, in conformità alle direttive comunitarie, è tenuta ad adottare per tutelare gli interessi generali di tutti gli amministrati.

In epoca antecedente alla emanazione del richiamato decreto legislativo n.152/2006, alle associazioni ambientaliste non era riconosciuta la tutela degli interessi urbanistici, ma dei soli interessi ambientali. In effetti, all' epoca gli indirizzi giurisprudenziali non furono univoci, in quanto per opera di una parte della giurisprudenza si è giunti al riconoscimento dell'interesse a ricorrere delle associazioni ambientaliste per la tutela di interessi ambientali non solo in senso stretto, bensì anche per quelli in senso lato, così come ha ribadito il Consiglio di Stato- IV Sezione- che, con sentenza del 9 ottobre 2002 n.5365, all'Associazione nazionale Italia Nostra onlus ha riconosciuto l'interesse a ricorrere in un giudizio avente ad oggetto l'inserimento di un'opera pubblica nel programma triennale di un ente in quanto erano stati ritenuti validi, oltre agli interessi storici ed artistici, anche quelli ambientali. Però, deve essere sottolineato che tale orientamento consentiva di proporre in giudizio solo motivi di gravame direttamente attinenti alla sfera dell'interesse tutelato e non per motivi aventi una valenza urbanistico-edilizia che esclusivamente in via strumentale ed indiretta erano collegati alla tutela di valori ambientali. Quindi, all'organo giudiziario spettava il compito di valutare volta per volta la qualità degli interessi coinvolti ed, in presenza di diritti ambientali intesi in senso lato, la tutela veniva estesa anche a valori connessi alla tutela del patrimonio ambientale, culturale, storico, artistico e dell'assetto del territorio di una determinata area.

Attualmente le associazioni ambientaliste, che per norme statutarie siano portatrici di interessi ambientali territorialmente determinati, sono legittimate ad agire in via autonoma e principale alla azione per risarcimento per danno ambientale anche in assenza di riconoscimento da parte del Ministero dell'ambiente. In effetti, in capo a tali associazioni è stata riconosciuta la titolarità di interessi collettivi legittimi comuni ad una categoria di soggetti che hanno deciso liberamente di associarsi allo scopo di salvaguardare e valorizzare l'ambiente. Non si tratta di interessi diffusi ed astratti, bensì di diritto all'ambiente di rilevanza costituzionale che non spetta solo ai soggetti pubblici, ma anche a persone singole ovvero associate.

Nell'ambito specifico inerente le associazioni ambientaliste, la legittimazione ad agire in giudizio ed a far valere pretese risarcitorie connesse a danno ambientale richiedono un concreto collegamento tra l'area territoriale interessata ai fatti di causa e l'attività svolta dall'ente associativo. Si mira sempre più a valorizzare ed a salvaguardare l'ambiente in senso lato, collegandolo a peculiari ambiti geografici e territoriali che impongono il rispetto e la tutela del patrimonio ambientale strettamente collegato con il paesaggio urbano, rurale e naturale, con i beni culturali, con le bellezze monumentali e con i centri storici.

La legittimazione ad agire per tali soggetti è valutata in relazione all'interesse vantato in giudizio che deve necessariamente essere funzionale al soddisfacimento di uno specifico interesse ambientale.

CONCLUSIONI

In virtù di tale orientamento legislativo e giurisprudenziale, agli organismi ambientalisti spetta la tutela giurisdizionale anche per atti aventi finalità urbanistica nei casi in cui si riscontrino specifici interessi ambientali che richiedano la modifica o l'annullamento totale o parziale dello strumento urbanistico.

Da una giurisdizione finalizzata alla tutela del singolo privato cittadino in difesa della propria posizione soggettiva, soprattutto nei confronti delle scelte attuate dalla amministrazione pubblica in modo unilaterale ed autoritario, si è passati ad una trasformazione del concetto di parte nei giudizi su problemi urbanistico-ambientali che assicura una più ampia protezione delle situazioni soggettive lese. E' stata compiuta una valorizzazione dell'aspetto soggettivo e della presenza degli interessi delle parti nei procedimenti giudiziari,

con conseguente assetto delle situazioni di ogni interesse ed aspettativa scaturenti dalla diretta partecipazione dell'amministrato al bene comune“ambiente”. Viene effettuata da parte della magistratura una puntuale valutazione della situazione sostanziale dedotta in giudizio ed appurata la sussistenza dell'interesse concreto, attuale e personale che, nel caso di specie, deve necessariamente essere collegato ad un criterio spazio-temporale da cui si possa evincere la identificazione di una determinata comunità costituita in un dato momento ed in un preciso ambito geografico-territoriale rispetto ad altri soggetti che ne risultino estranei.

Solo in tali circostanze possono essere tutelati in giudizio interessi collettivi e diffusi del gruppo ovvero della categoria ambientalista.

In tal modo è stata realizzata una effettiva tutela degli interessi sostanziali del cittadino, anche nel contesto di una entità collettiva, più o meno ampia, che rappresenti gli interessi dei propri amministrati e sia, pertanto, titolare di legittima posizione giuridica soggettiva funzionale al soddisfacimento di uno specifico interesse ambientale ed urbanistico.

La legittimazione ad agire è riferita, caso per caso, alla qualificazione della posizione sostanziale e valutata secondo principi generali che considerano concretamente l'attuale assetto e destinazione urbanistica di un territorio funzionale al soddisfacimento di uno specifico interesse ambientale. In virtù di questo orientamento, agli organismi ambientalisti, anche non governativi, che tuttavia abbiano come scopo la promozione della protezione per l'ambiente, è definitivamente riconosciuta, dopo un percorso lungo e difficoltoso, la qualità di soggetti portatori e promotori di interessi differenziati alla tutela degli interessi alla protezione dell'ambiente e, di conseguenza, ad essi è concessa la legittimazione all'esercizio dell'azione giudiziaria per la salvaguardia di interessi di natura ambientale riferiti alla più ampia ed effettiva tutela, conservazione e valorizzazione del patrimonio ambientale, dei beni culturali, del paesaggio urbano, rurale e naturale, dei monumenti, dei centri storici, artistici e della qualità della vita

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Legge 8 Luglio 1986 N° 349
2. Decreto Legislativo 3 Aprile 2006 N° 152 E Successive Integrazioni E Modificazioni
3. Riferimenti Costituzionali (Articoli 2, 3, 9, 18, 24, 32, 101)
4. Sentenza Del Consiglio Di Stato 9 Ottobre 2002 N° 5365
5. Sentenze Della Corte Costituzionale 22 Maggio 1987 N°210 e 30 Dicembre 1987 N° 641

ANALISI DEI COSTI DI TECNICHE COMBINATE DI DECONTAMINAZIONE ELETTROCINETICA E PHYTOREMEDIATION

Alberto Di Mulo[1], Marco Lupo[2], Dario Ticali[1]

[1]Università Kore di Enna, via della Cittadella, 94100 Enna
[2]MATTM (Ministero Ambiente e Tutela del Territorio e del Mare), via Cristoforo Colombo 44, 00186 ROMA

SOMMARIO

Bonificare un sito impone di affrontare problemi complessi di carattere multidisciplinare, che comprendono aspetti tecnologici, ambientali, economici e sociali e che quindi affrontino il problema in maniera olistica. Benché ogni intervento presenti caratteristiche peculiari e richieda studi sito-specifici, esistono linee comuni di approccio al problema e strutturazione dell'analisi per la selezione della migliore tecnologia, intendendo con tale termine quella che in corrispondenza di un range di investimento risulti maggiormente efficace. Esistono diverse metodologie di analisi in ordine alla applicazione dell'una o dell'altra tecnologia; tra esse le più note sono l'Analisi Costi/Benefici (ACB) e l'Analisi Costi/Efficacia (ACE). A tali procedure di valutazione si riferisce anche la vigente normativa in materia di bonifiche che invita all'adozione delle migliori tecniche di intervento a costi sostenibili (B.A.T.N.E.E.C. - Best Available Technology Not Entailing Excessive Costs).

Con il presente studio si è svolta quindi una valutazione economica di intervento in funzione di alcune tipologie di bonifiche dei suoli, riconosciute tra le più affidabili ed efficaci soprattutto nel caso di presenza di inquinanti quali i metalli pesanti. Le metodologie prese in esame sono quella di phytoremediation, di decontaminaizone elettrocinetica e quella combinata tra le due. Le considerazioni analitiche derivano dall'esame di esperienza maturata in laboratorio ed in situ, nonché dall'analisi di progetti già realizzati.

1 INTRODUZIONE

Il costo totale stimato per gli interventi di bonifica delle aree particolarmente inquinate è rappresentativo sia della gravità della contaminazione del sito sia del livello di riqualificazione cui si tende. A sua volta tanto maggiore è il danno ambientale tanto più elevata dovrebbe essere l'attenzione politica e sociale per la mitigazione degli effetti negativi sull'ambiente e sul territorio.

Da un punto di vista prettamente economico, poi, è importante rilevare che le spese sostenute per la messa in sicurezza, la bonifica ed il ripristino ambientale di un sito specifico sono assistite da privilegio speciale immobiliare sulle aree medesime, per cui è fondamentale conoscere a priori una stima delle stesse.

La consapevolezza delle difficoltà di una quantificazione teorica dei costi in grado di prescindere da fattori peculiari quali ad esempio tipologia e quantità dell'agente inquinante, modalità di contaminazione, tipo di suolo interessato, tipologia e profondità della falda, presenza di infrastrutture od attività antropiche, ecc., determina spesso nelle stime un'approssimazione generica che si riferisce soltanto ai costi degli interventi più comuni e dunque più facilmente quantificabili. Nulla però può dirsi a priori in termini di efficacia di intervento.

Numerosi sono gli studi scientifici ed i risultati cui si è pervenuti; in particolare, elevata risulta l'esperienza maturata dagli USA.

L'Agenzia Protezione e Ambiente (EPA) statunitense ha effettuato diversi studi di dettaglio (cfr EPA-542-R-01-009 2000) nei quali sono stati comparati i costi sostenuti per differenti tipologie di intervento. In particolare, come risultati generali, si sono trovate delle correlazioni tra la quantità di suolo contaminato trattato e il costo unitario del trattamento. L'approccio utilizzato per l'analisi è stato di tipo statistico. Sono stati raccolti i dati di costo di tutti i progetti di bonifica realizzati negli Stati Uniti ed elaborati statisticamente, fornendo così i risultati di massima rappresentati anche in forma grafica con curve di costo che interpolano un esponenziale decrescente per il quale la diminuzione del costo unitario del trattamento aumenta proporzionalmente al volume di terreno contaminato sottoposto a bonifica. I costi totali, poi, sono stati corretti per ogni singola tecnologia di bonifica con indici correttivi che tengono conto dell'inflazione, del tempo e della microeconomia della zona.

1.1 Approccio olistico per la scelta della tecnologia di bonifica piu idonea

L'importanza della scelta del trattamento di bonifica risulta essenziale non solo in termini di investimento necessario, ma anche di esito atteso e raggiunto. La messa in atto di interventi non corrispondenti alle effettive esigenze delle condizioni ambientali esistenti, potrebbe compromettere ulteriormente il sito ed aggravare da un punto di vista economico il soggetto deputato alla riqualifica dell'area.

Ne è testimonianza una nota sentenza di due giudici americani Larry Hourcle e George Washington della Law School di Washington, in base alla quale chi erroneamente genera o amplifica l'inquinamento o la sua estensione su un'area deve provvedere a proprio carico alla riqualifica dell'intero sito. Questa condizione, seppure apparentemente scontata, ha indotto a numerose contestazioni sia negli USA sia in Italia.

La non conoscenza scientifica delle effettive potenzialità di alcune tecniche i bonifica o la successiva acquisizione di una superficie già inquinata, ha generato contenziosi tra i soggetti

che hanno imposto le azioni e chi ha effettivamente la colpa del danno ambientale.

D'altro canto, l'innovazione necessita di sperimentare in vera grandezza e mettere in atto soluzioni tecniche e progettuali di esito incerto, ma che potrebbero offrire validi risultati a condizioni convenienti. La rigidità di approccio da parte delle autorità competenti ed il rischio eccessivo per gli operatori del settore, ha avuto come conseguenza, l'assenza di nuove forme di sperimentazione e quindi delle apposite valutazioni di efficacia. Le tecniche esistenti, inoltre, hanno consentito di raggiungere livelli modesti di risultato a fronte di costi sostenibili oppure risultati eccellenti a fronte di ingenti investimenti.

In tali condizioni, gli operatori del settore hanno riscontrato notevoli difficoltà nell'espletare gli interventi, con la conseguenza che la maggior parte dei siti da bonificare sono rimasti tali e le soluzioni tutte da ricercare.

La scelta della tecnologia appropriata richiede una serie di valutazioni molto complesse che non possono prescindere da una visione globale del problema.

Nasce pertanto la necessità di affrontare la schematizzazione delle varie fasi attraverso un approccio olistico (figura 1), ovvero un approccio globale e multidisciplinare che tenga conto di tutti i fattori che ne influenzano la scelta tecnica ma anche quella socio-economica.

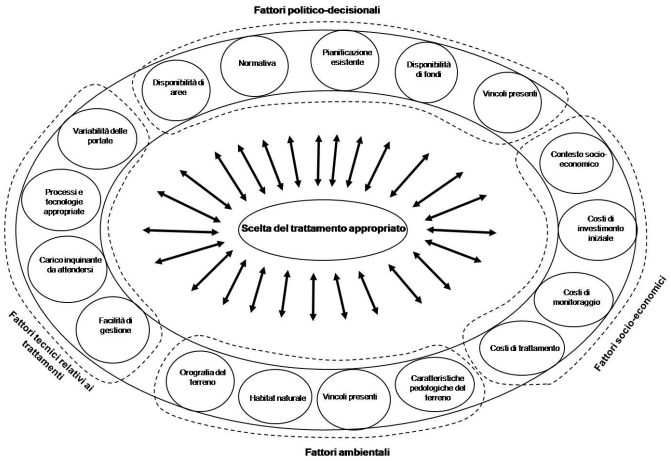


Figura 1. Approccio olistico per la scelta della tecnologia di bonifica più idonea.

La valutazione tecnica della metodologia ottimale deve basarsi su alcuni steps connessi alle condizioni del sito da bonificare:

- matrice: distribuzione granulometrica, ed in particolare il contenuto di argilla e la frazione di carbonio organico;
- superficie: estensione, contesto territoriale ed urbanistico, profondità della contaminazione, spessore degli strati da bonificare;
- contaminazione: tipologia e concentrazione di inquinante, Presenza/spessore di NAPL, Presenza di cosubstrato;
- condizioni operative: velocità e frequenza di miscelazione, pressione/depressione applicata, portata di acqua estratta, tempo di residenza, temperatura, pH, ecc;

Oltre a tali parametri, occorre tenerne altri derivati che influiscono sulla efficacia della bonifica attuata e possono sintetizzarsi in:

- *Volume di materiale da trattare;*
- *Permeabilità intrinseca;*
- *Permeabilità all'aria;*
- *Conducibilità idraulica;*
- *Trasmissività (T).*

Noti i fattori sito-specifici, la migliore tecnologia può essere individuata mediante l'analisi di rischio ed il rapporto costi benefici.

Lo stato dell'arte della conoscenza dei costi di bonifica delle tre tecnologie prese in esame nel presente studio è stato poco approfondito soprattutto per la tecnica combinata. Inoltre le indicazioni che i diversi autori hanno rilevato in materia di costi variano in un range talmente ampio che il valore perde di significatività.

2 TECNICHE DI BONIFICHE ANALIZZATE

2.1 Tecnica di Phytoremediation

Il costo associato a questa tecnologia di bonifica è altamente variabile e dipende dal contaminante, dalle proprietà del suolo, dalle condizioni del sito e dal volume di terreno da trattare. In media i costi variano da 270 €/m^2 per coltivare il sistema che rappresenta un costo di trattamento 0,03 – 1 €/m^3 per anno (considerando che la profondità del trattamento raggiunge il metro di profondità dal piano campagna) (Cunnigham et al 1995). In un altro studio (EPA-542-R-01-006, 2001), condotto dall'EPA viene data un'indicazione in merito alla bonifica di un terreno contaminato di circa mezzo ettaro dove si sono valutati i costi per l'intero trattamento variabili tra € 150.000 - €200.000.

In numerosi studi statunitensi i costi di phytoremediation sono suddivisi in tre categorie: costi di progetto, costi di installazione e costi operativi.

- **Costi di progetto:** caratterizzazione del sito, piano di lavoro e preparazione dei rapporti, prove in piccola scala;
- **Costi di installazione:** preparazione del sito, preparazione suolo, infrastrutture, piantagione;
- **Costi operativi:** mantenimento, monitoraggio.

In alcuni casi (cfr. David Glass ed altri) sono stati valutati i costi totali della tecnica di decontaminazione mediante phytoremediation mediamente il 50 - 80% più bassi delle altre soluzioni di bonifica a svantaggio del solo tempo di trattamento.

In una esperienza statunitense (Cunningham 1996) si sono valutati i costi relativi ad un trattamento di bonifica durato 30 anni in un sito di circa 5 ettari per un ammontare di € 12.000.000 per lo scavo e la rimozione, €6.300.000 per il lavaggio del terreno, € 600.000 per la protezione del terreno e € 200.000 *per la fitoestrazione.*

In sintesi, il trattamento di bonifica di casi generici di terreno contaminato da metalli pesanti hanno indicato che la fitoestrazione costerebbe circa un terzo del costo del lavaggio del terreno (Cornish et al, 1995).

Altri studi (Berti e Cunningham, 1997) (Cunningham 1996) hanno riportato un costo di bonifica mediante Nella tabella che segue vengono riportati i costi di phytoremediation a m^3 di terreno rispettivamente 7,5 e 7 €/m^3.

2.2 Decontaminazione elettrocinetica

Pochi sono i riferimenti di letteratura in merito a valutazioni di costi di bonifica mediante tecnica di decontaminazione elettrocinetica. I vari autori si limitano a dare un valore di costo di bonifica a metro cubo di terreno trattato in un range talmente ampio che il valore perde di significatività.

Solo la SNL (Sandia National Laboratories), cfr. EPA-540-R-97-509a 1998, ha sviluppato un sistema di ISEE in cui è stata fatta un'analisi dei costi e che costituisce, nel presente studio, la base di partenza scientifica della valutazione economica mediante decontaminazione elettrocinetica.

Il caso preso in esame riguarda un sistema di estrazione di contaminanti a bassa-manutenzione che può funzionare in maniera non controllata per i periodi di tempo lunghi. Questo metodo, adatto per la decontaminazione di terreni sabbiosi saturi, viene attuato con la messa a punto iniziale, il controllo periodico dell'esercizio di sistema e smantellamento e rimozione finale dell'apparecchiatura del sistema. Il costo di bonifica è ridotto significativamente per la natura passiva dell'intervento.

Gli agenti inquinanti vengono trasportati attraverso l'acqua interstiziale del terreno, raccolti e rimossi agli elettrodi. Inoltre gli agenti tensioattivi o i complessanti, permettono di applicare tale tecnica a molti agenti inquinanti oltre ai metalli pesanti.

Il sistema di ISEE-(In Situ Electrokinetic Extraction) (figura 2), in particolare, può essere alloggiato in un semirimorchio portatile, contenente i comandi dell'elettrodo, il gruppo di alimentazione ed i dati sistema dell'accumulazione.

Il costo di trattamento della tecnica di decontaminazione elettrocinetica dipende da numerosi fattori. Studi effettuati dall'EPA hanno attestato il costo della decontaminazione elettrocinetica intorno ai 120 €/m^3, e sono funzione della superficie e profondità del trattamento, concentrazione di contaminante iniziale, obiettivo finale della decontaminazione, caratteristiche del suolo, tasso ed efficienza di rimozione del contaminante. I dati disponibili in letteratura mettono in luce che la decontaminazione elettrocinetica ha costi di trattamento molto elevati e "sito-specifici", ossia molto condizionati dalla tipologia del sito di intervento.

Per ricercare la soluzione economicamente più conveniente e comparare i costi l'EPA (Environmental Protection Agency) ha raggruppato i costi in 12 categorie (Evans 1993):

- Autorizzazioni e costi di preparazione del sito;
- Costi per la concessione e l'indennizzo espropriativo;
- Costi della strumentazione;
- Costi iniziali e costi fissi;
- Costi del lavoro:
- Rifornimento e costi dei beni di consumo;
- Costi utilità;
- Costi di trattamento e smaltimento dell'effluente;
- Costi di trasporto materiale e piccole attrezzature;
- Costi analitici;
- Costi di eventuali varianti, riparazioni e sostituzioni in corso d'opera;
- Costi di ripristino del sito.

2.3 Tecnica combinata di Phytoremediation e decontaminazione elettrocinetica

In letteratura sono presenti pochi dati disponibili, per cui per la valutazione economica si è proceduto mediante correlazione

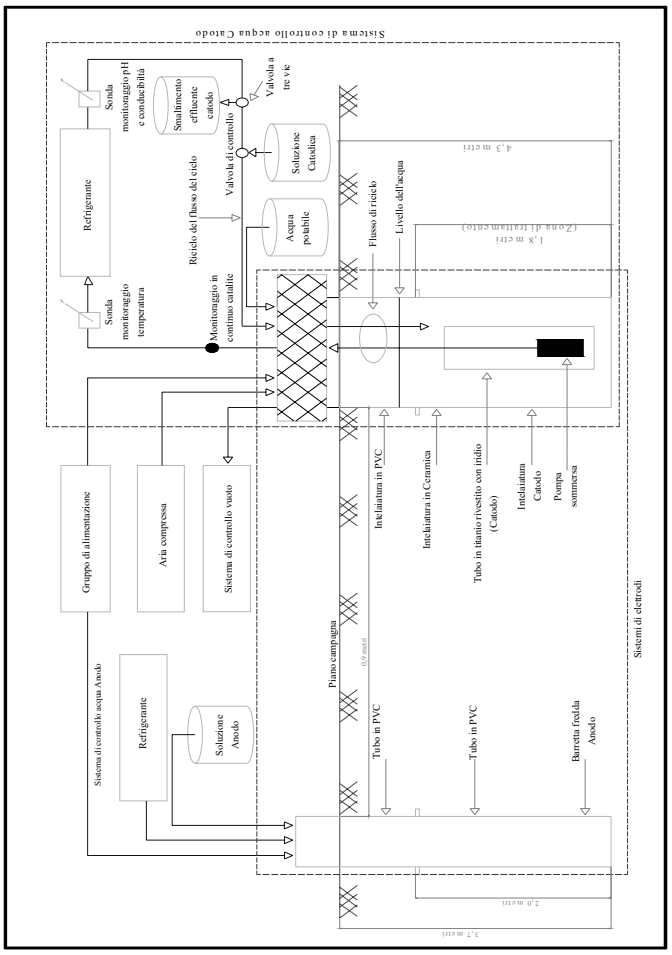


Figura 2. Schema progettuale ISEE (In situ ElectroKineticExtraction).

dell'analisi delle due tecniche singole di decontaminazione phytoremediation e di quella elettrocinetica.

Dopo un'approfondita ricerca bibliografica in tema di analisi dei costi di tecniche di decontaminazione mediante phytoremediation, decontaminazione elettrocinetica e tecniche combinate come riportato nei paragrafi precedenti, sono stati elaborati computi metrici relativamente a diverse superfici di terreno da bonificare, ipotizzate di forma quadrata ed estese:

- 100 m^2
- 200 m^2
- 400 m^2
- 600 m^2
- 800 m^2
- 1.000 m^2
- 2.000 m^2
- 4.000 m^2
- 6.000 m^2
- 8.000 m^2
- 10.000 m^2

Le stime sono suddivise nelle tre voci principali:

- **costi di indagine**, comprensivi degli studi riguardanti sia gli aspetti geologici ed idrogeologici caratteristici del sito, sia la caratterizzazione delle fonti di contaminazione (non considerate nella valutazione);
- **costi di intervento**, per la bonifica e/o la messa in sicurezza, calcolati sulla base della tecnologia di bonifica utilizzabile;
- **costi di monitoraggio**, inteso come monitoraggio da

effettuare al termine delle operazioni di bonifica. Nei casi di bonifica con interventi di rimozione e smaltimento dei rifiuti e/o del suolo inquinato, il monitoraggio può anche essere molto ridotto, ma in tutti gli altri casi assume un peso non trascurabile, anche perché protratto nel tempo.

Ai fini comparativi, lo schema progettuale adottato per le tre tecnologie è stato ipotizzato identico.

In particolare per tutte le superfici è stato previsto uno spianamento generale dell'area al fine di portarlo ai giusti livelli per il deflusso dell'acqua meteorica, un decespugliamento del terreno nell'eventualità che sia infestato da arbusti e l'eventuale rimozione di opere in ferro. Per la tecnica di phytoremediation e combinata è stato previsto un amminutamento del terreno, preparazione del terreno alla semina, successiva semina, ed estrazione delle piante a fine ciclo. È stato previsto un sistema di drenaggio dell'area per tutte e tre le tecnologie.

Sia la tecnica combinata che quella di decontaminazione elettrocinetica ha previsto l'utilizzo di elettrodi disposti a maglia quadrata di lato 1 m alimentati da generatori di tensione. È stato previsto un corridoio centrale in lastre di conglomerato cementizio per eventuali operazioni di manutenzione. Tutte le superfici sono state recintate e munite di cancello.

Il monitoraggio dei parametri ambientali e dei parametri relativi al suolo quale pH, temperatura, umidità sono affidate a delle centraline autoalimentate con pannelli fotovoltaici che trasmettono attraverso un modem collocato nell'ufficio mobile, previsto nel sito, i dati alla rete (possibilità del tecnico di monitorare a distanza). Laddove è prevista l'irrigazione, la centralina gestisce un'elettrovalvola che per dati valori di temperatura e umidità del suolo aziona l'innaffiamento a goccia e la tubazione è disposta a distanza di 1 metro.

La concentrazione di contaminante (Piombo) nel terreno soggetto all'intervento di bonifica è stata assunta pari a 3.000 ppm.

Sono stati considerati due diverse destinazioni d'uso definite dalla normativa, ovvero suolo con destinazione d'uso residenziale e suolo con destinazione d'uso industriale, condizione che fa variare gli obiettivi della bonifica. Infatti, mentre nel primo caso, come riportato nella tabella 1 dell'allegato 5 della parte IV del D.Lgs 152/2006, il limite risulta 100 mg/Kg cui equivalgono tempi di bonifica più lunghi (9,5 anni per la phytoremediation, 5 mesi per la decontaminazione elettrocinetica e 7,6 anni per la tecnica combinata), nel secondo caso il limite è di 1.000 mg/Kg con tempi di bonifica più brevi (6,5 anni per la phytoremediation, 3 mesi per la decontaminazione elettrocinetica e 5,2 anni per la tecnica combinata).

Le voci considerate, nell'elaborazione dei computi metrici per le tre tecnologie in esame nel presente studio sono riportate nella tabella 1.

3 CONFRONTO ECONOMICO TECNOLOGIE

Il confronto economico delle tre tecnologie esaminate (Ved. figure 3÷8) evidenzia costi elevati della decontaminazione elettrocinetica a vantaggio di tempi di trattamento (pochi mesi), i costi relativamente bassi della phytoremediation a svantaggio dei tempi di trattamento (7-10 anni) e i costi della tecnica combinata individuati nella media dei primi due.

Tabella 1. Costi per categorie per le tre tecnologie in esame.

Costi categorie	Phytoremediation	Decontaminazione elettrocinetica	Tecnica combinata
Costi di progetto	*Oneri di progettazione*	*Oneri di progettazione*	*Oneri di progettazione*
	Caratterizzazione del sito	*Caratterizzazione del sito*	*Caratterizzazione del sito*
	Prove su scala pilota	*Prove su scala pilota*	*Prove su scala pilota*
Costi di installazione	**Preparazione del sito**	**Preparazione del sito**	**Preparazione del sito**
	Spianamento generale dell'area	*Spianamento generale dell'area*	*Spianamento generale dell'area*
	Rimozione strutture	*Rimozione strutture*	*Rimozione strutture*
	Decespugliamento del terreno infestato da arbusti	*Decespugliamento del terreno infestato da arbusti*	*Decespugliamento del terreno infestato da arbusti*
	Rimozione detriti - opere in ferro	*Rimozione detriti - opere in ferro*	*Rimozione detriti - opere in ferro*
	Rimozione/riallocazione life - Line	*Rimozione/riallocazione life - Line*	*Rimozione/riallocazione life - Line*
	Preparazione del suolo	**Infrastrutture area, impianto**	**Infrastrutture area, impianto**
	Amminutamento del terreno	*Recinzione, cancello*	*Amminutamento del terreno*
	Preparazione del terreno al trapianto	*Ufficio mobile*	*Preparazione del terreno al trapianto*
	Preparazione del terreno alla semina (ogni ciclo)	*Intelaiatura elettrodi, collegamenti*	*Preparazione del terreno alla semina (ogni ciclo)*
	Drenaggio	*Pompe sommerse, refrigeranti*	*Piantagione (ogni ciclo)*
	Infrastrutture	*Elettrodi*	*Drenaggio*
	Sistema di irrigazione	*Generatore di tensione*	*Sistema di irrigazione*
	Recinzione, cancello, sistemazione area		*Recinzione, cancello, sistemazione area*
	Piantagione (ogni ciclo)		*Ufficio mobile*
	Ufficio mobile		*Elettrodi*
			Generatore di tensione
Costi operativi	**Mantenimento**	**Mantenimento**	**Mantenimento**
	Acqua di irrigazione	*Energia*	*Energia*
	Soluzione concimante	*Spese impreviste*	*Aspirazione piante (ogni ciclo)*
	Agenti chelanti	**Monitoraggio suolo**	*Spese impreviste*
	Pesticidi	*pH , temperatura, conducibilità*	**Monitoraggio suolo**
	Ripiantamento	*Lavoro operaio specializzato*	*Contenuto di umidità e temperatura suolo*
	Spese impreviste	**Costi di trattamento e smaltimento effluente**	*pH suolo, conducibilità*
	Aspirazione piante (ogni ciclo)	*Effluente catodo*	*Acqua suolo*
	Monitoraggio		*Stato di nutrimento della pianta*
	Contenuto di umidità e temperatura suolo		*Stato di contaminazione della pianta*
	pH suolo		*Parametri ambientali*
	Acqua suolo		*Lavoro operaio specializzato*
	Stato di nutrimento della pianta		
	Stato di contaminazione della pianta		
	Parametri ambientali		
	Lavoro operaio specializzato		

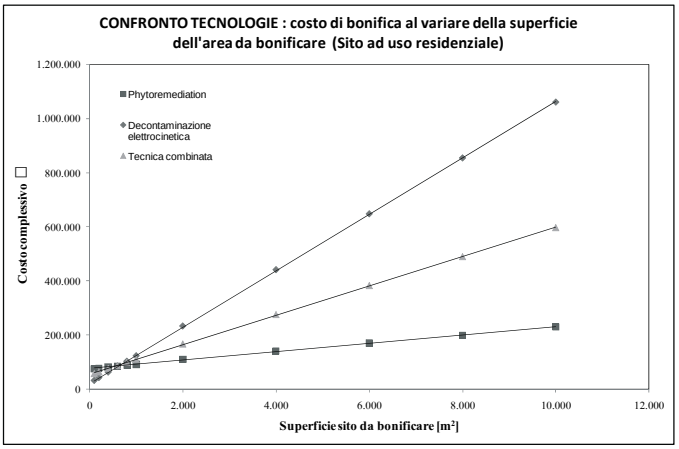


Figura 3. Confronto tecnologie: costo di bonifica al variare della superficie dell'area da bonificare (Sito ad uso residenziale).

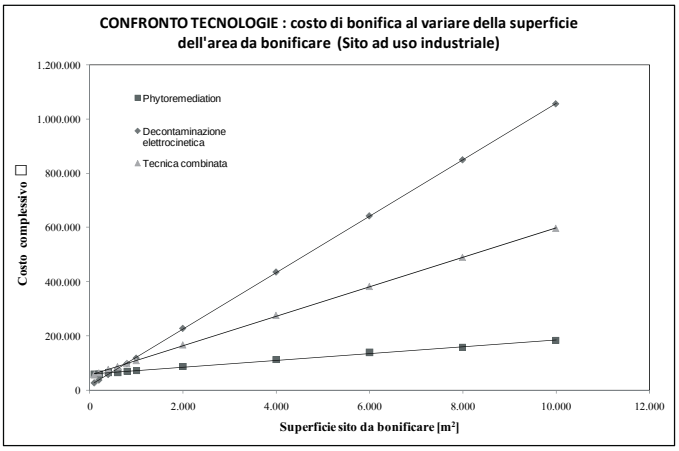


Figura 4. Confronto tecnologie: costo di bonifica al variare della superficie dell'area da bonificare (Sito ad uso industriale).

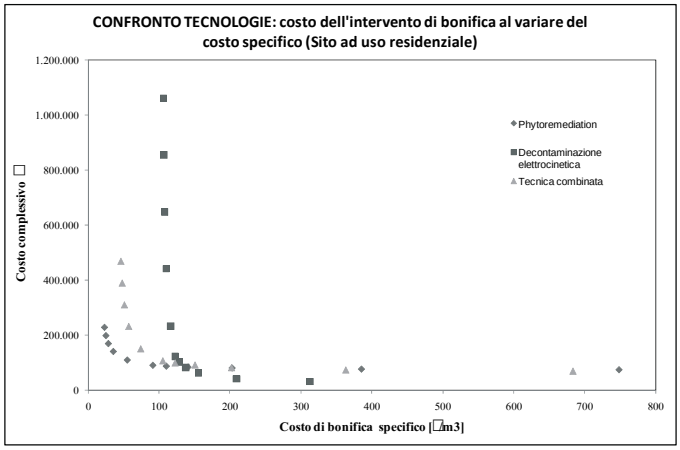


Figura 51. Confronto tecnologie:costo dell'intervento di bonifica al variare del costo specifico (Sito ad uso residenziale).

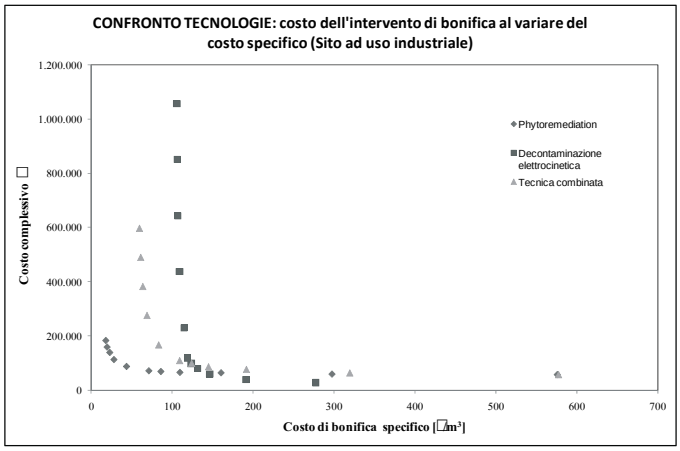


Figura 6. Confronto tecnologie:costo dell'intervento di bonifica al variare del costo specifico (Sito ad uso industriale).

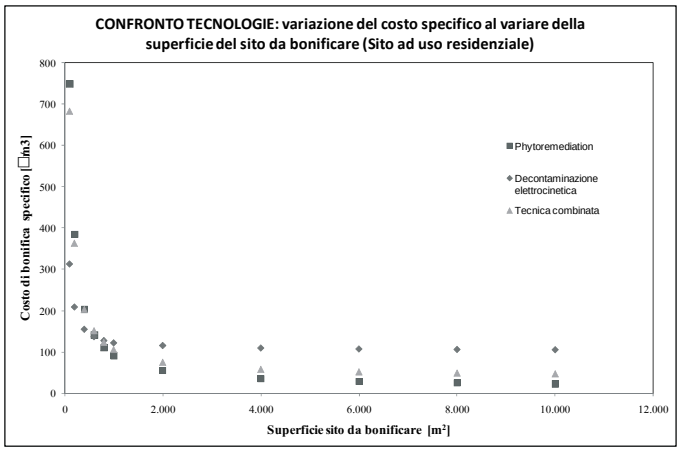


Figura 7. Confronto tecnologie: variazione del costo specifico al variare della superficie del sito da bonificare (Sito ad uso residenziale).

4 CONCLUSIONI

L'analisi dei costi effettuata per diverse superfici, per diverse destinazioni d'uso del sito da bonificare e per le tre tecnologie oggetto del presente studio (phytoremediation, decontaminazione elettrocinetica e tecnica combinata) ha

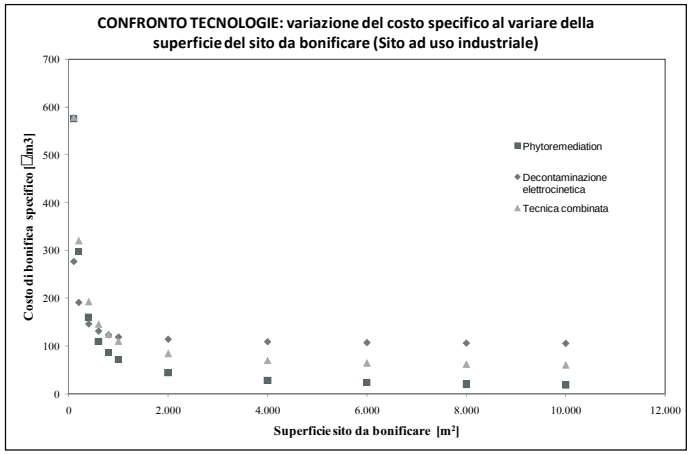


Figura 8. Confronto tecnologie: variazione del costo specifico al variare della superficie del sito da bonificare (Sito ad uso industriale).

permesso di valutare la sosteniblità economica dell'una o dell'altra metodologia.

Il costo complessivo dell'intero intervento di bonifica ottenuto dal computo metrico elaborato per ogni superficie e per le due destinazioni d'uso ha mostrato che vi è un andamento lineare tra superficie e costo complessivo dell'intervento. Si è dimostrato che il costo specifico di un intervento di bonifica aumenta al diminuire del costo complessivo. Ciò è ascrivibile al fatto che i costi fissi hanno un peso maggiore per interventi su piccole superfici e viceversa per le grandi superfici.

I valori reali oscillano casualmente attorno alle linee di tendenza utilizzate, intese come quelle che minimizzano la somma dei quadrati degli scarti dei valori osservati da quelli ipotizzati (che stanno sulla linea). I valori di R^2 ottenuti sono prossimi all'unità, ne segue che i modelli utilizzati approssimano ottimamente l'andamento reale.

A scala più generale, la scelta dell'intervento di bonifica è molto complessa e non può che tradursi, per un primo screening, in un approccio olistico a valle del quale occorre affinare tale scelta con un sistema più meticoloso che tenga conto di parametri specifici.

Il presente studio si è limitato alla valutazione dei costi diretti di intervento per le tre tecnologie di bonifica di phytoremediation, decontaminazione elettrocinetica e tecnica combinata tra le due.

Per una applicazione in vera grandezza, però, l'analisi economica non può prescindere dalle condzioni sito-specifiche con particolare riferimento alla complessità dell'area, alla sua valenza strategica, alla presenza di emergenze storico-artistiche-naturalistiche, ecc.

Con un successivo studio si intende, infatti, esaminare l'applicazione ipotetica delle tre tecnologie ad uno dei siti SIN da un punto di vista ambientale più compromesso d'Italia. L'analisi verrà effettuata valutando anche i benefici ottenuti rapportati alle date in cui si conseguono.

Tale ulteriore analisi potrebbe rappresentare un valido metodo di valutazione per la prescrizione di una tecnologia di bonifica, nel rispetto della direttiva europea e della sostenibilità tecnico-economica cui gli impianti industriali devono sempre essere sottoposti.

5 BIBLIOGRAFIA

1. Cumming et al. Metal tolerance in plants: signal trasduction and acclimations mechanism.

Biogeochemistry of trace metals. Lewis Publishers, boca Raton, Florida, 1992.
2. Cunnigham et al. «Phytoremediation of contaminated soil.» 1995.
3. Cunningham et al. Promises and prospects of phytoremediation. Plant Physiol 110 715-719, 1996.
4. Dixon et al. The effetctiveness of low-cost soil treatments to reduce soil and dust lead hazard: The boston lead safe yards low cost lead in soil treatment, demonstration and evaluation. Environmental Research 102 113-124, 2006.
5. EPA-542-R-01-009. «Remediaton Technology Cost Compendium.» 2000.
6. EPA. http://cluin.org/techfocus/.
7. EPA. In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil. ENGINEERING FORUM ISSUE PAPER, 2006.
8. EPA-540-R-97-509. «Sandia National Laboratories In Situ Electrokinetic Extraction Technology.» 1999.
9. EPA-540-R-97-509a. «SITE Technology Capsule, In Situ Electrokinetic Extraction System.» 1998.
10. EPA-542-R-01-006. «Brownfields Technology Primer:Selecting and Using Phytoremediation for Site Cleanup.» 2001.
11. Hourcle. «Sentenza della corte dei conti.»
12. Lim et al. Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical considerations. Plant and Soil 249 107-115, 2003.
13. Mulligan et al. «Remediation technologies for metal-contaminated solis end groundwater: an evaluation.» 2001.
14. O' Connor et al. The combinated use of electrokinetic remediation and phytoremediation to dentaminate metal-polluted soils: a laboratory-scale feasibility study. Liverpool U.K.: School of Biological and Earth Sciences, Liverpool John Moores University, 2003.
15. Bonomo. Bonifica dei Siti: Caratterizzazione e tecnologie di risanamento. McGraw-Will, 2005.
16. Bonomo et al. MIGLIORI TECNOLOGIE DISPONIBILI A COSTI SOPPORTABILI: Aspetti tecnici. Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica Ambientale e del Rilevamento -Sez. Ambientale, Piazza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano.
17. Decreto Legislativo 3 aprile n° 152, recante "Norme in materia ambientale". pubblicato nella G.U. n° 88 del 14/04/2006.

PROCEDURA DI VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE DA DILAVAMENTO DI PAVIMENTAZIONI STRADALI SUI CORPI IDRICI RICETTORI

Alberto Di Mulo[1], Marco Lupo[2], Dario Ticali[1]

[1]Università Kore di Enna, via della Cittadella, 94100 Enna
[2]MATTM (Ministero Ambiente e Tutela del Territorio e del Mare), via Cristoforo Colombo 44, 00186 ROMA

SOMMARIO

La presenza dell'elevato traffico veicolare circolante in ambito nazionale ed il connesso apporto di inquinante immesso in atmosfera, rappresenta una delle maggiori criticità ambientali per le quali il governo ed il mondo scientifico si sono attivati già dagli anni '80. È stato invece trascurato l'aspetto che riguarda l'apporto di inquinante idrico dal dilavamento naturale e artificiale delle sovrastrutture stradali, che per estensione raggiungono valori paragonabili alle aree costruite.

Il presente lavoro intende valutare l'impatto ambientale da dilavamento delle pavimentazioni stradali utilizzando la modellistica disponibile in letteratura, partendo da un confronto dei diversi modelli adottati in ambito internazionale per l'analisi del fenomeno del dilavamento stradale sia in campo urbano che in campo extraurbano.

Tra i vari modelli analizzati, lo studio ha focalizzato l'attenzione su due modelli elaborati per l'applicazione in ambito extraurbano dalla Federal Highway Administration ed ormai ampiamente diffusi negli Stati Uniti.

L'impiego del primo modello ha consentito di determinare in maniera analitica la quantità attesa di inquinanti dalle acque di dilavamento della piattaforma stradale. I risultati ottenuti rappresentano i dati di input per il secondo modello che, invece, attraverso un approccio probabilistico, ha permesso di calcolare la concentrazione media dei principali inquinanti nell'acqua del corpo idrico ricettore.

La correlazione dei due modelli ottenuta tramite una simulazione con il metodo "Monte Carlo", ha condotto alla elaborazione di un unico modello capace di coniugare il dettaglio analitico previsionale del primo con l'approccio probabilistico del secondo, fornendo valori finali assimilabili a quelli ottenuti dall'impiego consecutivo dei due modelli.

1 INTRODUZIONE

Una infrastruttura stradale è un'opera che si estende su una superficie distribuita sul territorio, alterando significativamente quest'ultimo sia in termini paesaggistici sia ambientali e di destinazione d'uso.

Sono note le problematiche legate all'inquinamento atmosferico e da rumore prodotto dal traffico circolante, ma altrettanto non può dirsi per il problema dell'accumulo di inquinanti sulla piattaforma stradale e del successivo dilavamento e trasporto nella rete di drenaggio e immissione nei comparti ambientali, suolo e ambiente idrico. Sebbene troppo spesso trascurato, il livello di inquinamento idrico, a volte, può raggiungere livelli di criticità tali da rendere necessari interventi di depurazione o trattamento prima di immettere i reflui al suolo.

Come noto, l'inquinamento prodotto dalle acque di ruscellamento delle superfici antropizzate si potrebbe aggiungere a quello generato anche dal dilavamento dei bacini idrografici afferenti la rete di drenaggio che a sua volta appartengono al bacino imbrifero preso in esame. In particolare vengono distinte le seguenti fasi:

1. Accumulo
2. Dilavamento
3. Trasporto

Le acque meteoriche vengono considerate di dilavamento nel caso in cui l'impatto delle gocce sulla pavimentazione e il processo di scorrimento superficiale comporti la risospensione (detachment) ed il trasporto (wash-off) di sostanze inquinanti che si sono depositate sulle superfici nel periodo che intercorre tra un evento piovoso e il successivo (build-up) (Lanza, 2004).

Obiettivo del presente studio è proprio quello di determinare una metodologia semplificata di analisi del fenomeno di dilavamento stradale e valutarne l'impatto, mediante l'ausilio di modelli già adottati in ambito internazionale ed applicati in ambito extraurbano.

1.1 Approccio olistico per la schematizzazione del fenomeno del dilavamento stradale

Il fenomeno del dilavamento stradale rappresenta il secondo dei tre processi che schematizzano e modellizzano la formazione e la propagazione di inquinanti nella piattaforma stradale e nella rete di drenaggio.

Prima di tutto viene considerato l'*accumulo* (build up) di sostanze inquinanti sulla superficie stradale, in fognatura e sul bacino in assenza di pioggia; si esamina quindi il *dilavamento* della superficie durante gli eventi di pioggia e l'ingresso in fognatura o nei corpi idrici ricettori delle sostanze inquinanti rispettivamente in ambito urbano ed extraurbano. Infine si affronta il *trasporto* di inquinanti nella rete di drenaggio incluso il deposito e l'erosione dei sedimenti e la trasformazione degli stessi per reazione chimica.

Il valore del carico inquinante è influenzato da diversi fattori, di cui i principali sono gli agenti atmosferici, il traffico veicolare, le emissioni da impianti industriali e termici, l'applicazione di fertilizzanti e pesticidi in prati e altre aree verdi, lo spargimento di sostanze antigelo e la deposizione di materiale grossolano sulle superfici. In ambito urbano, gioca un ruolo essenziale l'efficienza e la frequenza della pulizia stradale operata con mezzi meccanici dagli Enti pubblici preposti.

L'accumulo nella rete di drenaggio (ambito urbano) in assenza di pioggia è invece funzione essenzialmente del numero di abitanti e del tipo di insediamento, delle caratteristiche geometriche e altimetriche della rete fognaria, ed ovviamente dipende anche dalle reazioni chimiche e biologiche che interesseranno il sedimento.

Per la schematizzazione del fenomeno si riporta di seguito (figura 1) l'approccio olistico, ovvero l'approccio globale e multidisciplinare che tiene conto di tutti i fattori che lo influenzano.

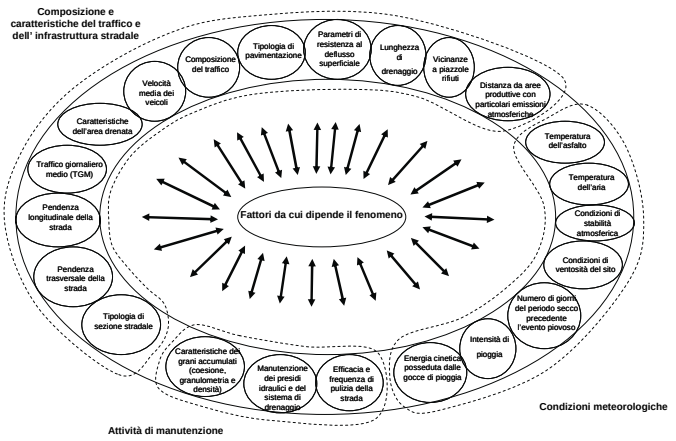


Figura 1. Approccio olistico per la schematizzazione del fenomeno.

Gli inquinanti che possono trovarsi nelle acque di lavaggio riportati in diversi studi [3,4] possono avere come vettore principale i solidi sospesi, la cui misura espressa come Solidi Sospesi Totali (TSS), rappresenta un buon indicatore complessivo del carico inquinante (Chebbo et al., 1990).

2 MODELLI ANALIZZATI

2.1 Modello FHWA 1

Sulla scorta degli studi e delle ricerche effettuate in USA con il metodo in questione, si è ritenuto che la formulazione più idonea [1][2][3][4] (attualmente la più diffusa) è quella di un modello di tipo esponenziale come segue:

Equazione 1. Quantità di inquinante asportata dalla superficie stradale.

$$P_w = P\left[1 - e^{-\alpha(t-t_0)}\right]$$

dove
Pw = quantità di inquinante asportata dalla superficie stradale
P = quantità di inquinante presente sul piano viabile all'istante iniziale t_0
t = tempo dopo l'ultimo evento piovoso o di pulizia della strada
α = esponente caratterizzante le specifiche condizioni del sito avente le dimensioni dell'inverso di un tempo

La ipotesi di base del modello è che al tempo (t) generico la quantità di inquinante presente nell'acqua di ruscellamento stradale Pw(t) è direttamente proporzionale alla quantità di inquinante V(t) accumulatasi sulla superficie stradale e cioè:

Equazione 2. Proporzionalità tra quantità di inquinante asportato con il volume di pioggia del generico evento piovoso.

$$P_w(t) = \alpha V(t)$$

Il fenomeno di smaltimento dell'inquinante è governato dall'equazione di continuità espressa dalla seguente equazione.

Equazione 3. Equazione di continuità che gestisce il fenomeno di smaltimento dell'inquinante dalla piattaforma stradale.

$$\frac{dV}{dt} + P_w(t) = 0$$

Da cui per sostituzione si ottiene:

Equazione 4. Equazione differenziale ottenuta dopo le relative sostituzioni.

$$\frac{1}{\alpha}\frac{dP(t)}{dt} + P(t) = 0$$

Espressioni di questo tipo sono state assunte nei documenti tecnici del Ministero dei Trasporti francese e nel manuale sviluppato dalla Federal Highway Administration statunitense (FHWA).

La quantità di carico inquinante asportato dal generico evento piovoso è fornita dalla relazione :

Equazione 5. Quantità di carico inquinante asportato dal generico evento piovoso.

$$P_w = P\left[1 - e^{-K2^*\frac{Q}{TD}}\right]$$

in cui:
P = quantità complessiva di inquinante presente sul piano viabile all'istante to. Essa deve essere rilevata sperimentalmente e varia in funzione del traffico presente sulla strada, del numero di giorni trascorsi tra due eventi piovosi e della lunghezza di drenaggio.

In assenza di rilievi sperimentali, lo studio americano della FHWA invece propone la seguente relazione:

Equazione 6. Quantità di inquinante complessiva sul piano viabile.

$$P = P_0 + K1 \times GS \times HL$$

ove
K1 = *Tasso di accumulo dell'inquinante,* è espresso sulla pavimentazione stradale in Kg/(Kmxgiorno) ed è funzione del traffico giornaliero medio (TGM) secondo la relazione:

Equazione 7. Tasso di accumulo dell'inquinante.

$$K1 = 0{,}007 \times TGM^{0{,}89}$$

HL = lunghezza di drenaggio
GS = numero di giorni trascorsi fra due eventi piovosi
Po = quantità di sostanze inquinanti presenti sulla pavimentazione stradale dopo che l'evento piovoso "i-1" ha asportato una parte del carico inquinante presente. Po rappresenta quindi le condizioni iniziali dell'evento "i" e si determina in funzione dell'evento piovoso[1].

La quantità di carico inquinante rispetto al totale P presente sul tratto di strada, asportato dal generico evento piovoso è:

[1] P_0 assume il valore in funzione di una delle seguenti circostanze:

1. Grande Evento Piovoso (GEP), ossia evento successivo ad una pioggia che ha completamente asportato dalla pavimentazione stradale tutti i rifiuti, nel cui caso è Po = 0;
2. evento successivo ad una pioggia di intensità e durata tali da non riuscire a dilavare completamente tutti i rifiuti presenti sulla pavimentazione stradale, nel cui caso si ha:

$$P_0 = K1 \times TM \times HL$$

in cui, oltre i termini già noti
TM è il tempo di accumulo, cioè il numero di giorni trascorsi dall'ultimo evento piovoso.

Equazione 8. Carico inquinante asportato.

$$P_w = P\left[1 - e^{-K2*r}\right]$$

in cui oltre i termini già noti:

Pw = carico inquinante asportato

K2 = coefficiente di lavaggio che secondo i risultati della sperimentazione americana, assume i seguenti valori:

- 5,0 per una strada urbana (*tipo I - FHWA*);
- 6,5 per una strada extraurbana (*tipo II - FHWA);*
- 12,0 per una strada rurale (*tipo III - FHWA)*;

r = grandezza avente le dimensioni di una portata unitaria, pari al rapporto fra volume efficace unitario di acqua "Q" (in mm) presente nel bacino di drenaggio affluente ed il tempo di dilavamento o tempo di corrivazione "TD"(in ore)

Individuato il "bacino imbrifero", mediante formule empiriche (Giandotti e Kirpich, Merlo), si può determinare la portata massima che giunge alle cunette.

Il carico residuo equivalente al termine di un evento piovoso diventa:

Equazione 9. Carico inquinante residuo al termine di un evento piovoso.

$$\Pr = P - Pw = Po$$

Il carico inquinante Pw, rappresenta la quantità di Solidi totali (ST) asportati dal piano viabile dal generico evento piovoso "i" :

Equazione 10. Carico inquinante asportato uguale ai solidi totali.

$$Pw = ST$$

La scelta dei solidi totali espressi come grandezza caratteristica dell'inquinante trasportato deriva dalla elevata correlazione con gli altri elementi monitorati nel corso delle numerose sperimentazioni effettuate negli USA.

La quantità dei singoli inquinanti presenti nelle acque di ruscellamento viene quindi legata al contenuto di solidi totali con una relazione del tipo:

Equazione 11. Quantità dei singoli inquinanti presenti nell'acqua di ruscellamento.

$$XX = u \times ST + v$$

dove

XX rappresenta il generico inquinante

"u" ,"v" sono tabellati dalla FHWA.

Tabella 1. Valori dei coefficienti u ,v .

	Strada tipo I		**Strada tipoII**		**Strada tipo III**	
Inquinante	**u**	**v**	**u**	**V**	**u**	**V**
TVS	,221	13,3	,263	243,0	,32	-32,30
COD	,202	5,47	,193	275,3	,087	,65
BOD	,023	1,5	,03	28,3	-	-
Pb	,0056	-,024	,001	,04	,0004	-0,29
Zn	,0008	,014	,00058	,103	,0027	-,011
Fe	,015	,59	,020	-5,0	,014	1,61

Con

TVS = Solidi Volatili Totali

COD = Richiesta chimica di ossigeno

BOD = Richiesta biologica di ossigeno

Pb = Piombo

Zn = Zinco

Fe = Ferro

Il modello finora esposto è stato costruito sulla base di ricerche teoriche e sperimentali valide per i dati statunitensi, sui quali è stato tarato. I dati, infatti, sono correlati alle effettive condizioni metereologiche e geometriche dell'infrastruttura in osservazione nonché del TGM e dei veicoli circolanti in USA.

2.1.1 Considerazioni sul modello. Le varie conclusioni cui sono pervenuti i vari autori [2] e [3] che hanno affrontato i modelli sopra descritti possono riassumersi in una differenza tra il potenziale inquinante prodotto dalle diverse strade ed una variazione di concentrazione dei tre elementi Pb, Zn, BOD nelle acque di ruscellamento in funzione delle tre grandezze fondamentali di intensità di pioggia, lunghezza di drenaggio e traffico giornaliero medio.

Come ci si poteva attendere, in ambito urbano la presenza di metalli pesanti nei solidi totali è più elevata che in ambito extraurbano, dove invece sono presenti in misura maggiore gli inquinanti di natura biologica (es: BOD).

Inoltre, nelle strade urbane all'aumentare dell'intensità di pioggia corrisponde inizialmente un aumento della concentrazione del piombo fino ad un massimo in corrispondenza di un valore della precipitazione variabile in funzione inversa con la lunghezza di drenaggio, oltre il quale la concentrazione del piombo inizia a diminuire. A parità di intensità di pioggia il potere inquinante delle acque di ruscellamento sull'ambiente circostante aumenta con la lunghezza di drenaggio e con il TGM. Queste ultime due grandezze influiscono in maniera limitata sulla concentrazione del piombo quando l'intensità di pioggia supera i 40 mm/h.

In ambito urbano, per le condizioni esaminate, risulta che la concentrazione del piombo nelle acque reflue è contenuta nei limiti per traffici non superiori a 10.000 veicoli al giorno. Nei casi in cui il TGM supera tale soglia è necessario condurre uno studio di dettaglio per analizzare il problema, conducendo analisi sull'entità delle precipitazioni possibili e sul livello di contaminazione accumulatasi.

In quest'ultimo caso, può risultare conveniente per esempio ridurre la lunghezza di drenaggio a circa 120 ml, per compensare valori di traffico elevati (circa TGM = 30.000) ed intensità di pioggia superiore a 30 mm/h, garantendo così una concentrazione di Pb inferiore al limite di 0,2 mg/l come previsto da norma.

Nelle strade extraurbane la concentrazione di Pb ha invece un andamento sempre decrescente all'aumentare dell'intensità di pioggia e risulta poco sensibile sia alla variabilità del traffico che alla lunghezza di drenaggio. Eccetto che per intensità di pioggia inferiori a 10 mm/h una variazione della lunghezza di drenaggio da 500 a 5500 m non comporta evidenti variazioni di concentrazione del Pb. Come limite di criticità del problema è stata individuata una pioggia inferiore a 20 mm/h con lunghezze di drenaggio superiori a 500 m.

Per il BOD e lo Zn l'aumentare dell'intensità di pioggia provoca un decadimento della concentrazione e la lunghezza di drenaggio interviene in modo sensibile nella diminuzione della concentrazione.

In ambito extraurbano l'inquinamento biologico risulta più importante che in ambito urbano.

Per lunghezze di drenaggio inferiori a 500 m e per intensità di pioggia usualmente registrate in Italia non si raggiungono mai valori ammissibili di concentrazione di BOD. In tal caso occorre intervenire con progetti specifici essendo non sufficienti i percorsi di drenaggio.

In ambito urbano invece, già con lunghezze di drenaggio di 100 m, si riesce a contenere l'inquinamento biologico delle acque nei limiti consentiti, quando le intensità di pioggia sono maggiori o uguali a 15 mm/h.

2.2 Modello FHWA 2

L'obiettivo del modello [5] [6] [7] di approfondimento del sesto volume Envirex Report statunitense del 1981, è rivolto a definire una procedura per stimare gli inquinanti presenti nell'acqua di dilavamento stradale e il relativo impatto sui corpi idrici ricettori (laghi o fiumi).

I dati di input riguardano anche in questo caso fattori quali: densità del traffico, numero di corsie, velocità del traffico, tipo di sezione, tipo di superficie, vicinanza alle intersezioni, uso del suolo dell'area drenata, spartitraffico, esistenza di rallentamenti ed efficienza della rete di drenaggio.

La procedura sviluppata si basa su un modello di probabilità di diluizione sviluppato e applicato dall'Environmental Protection Agency's (EPA), dal Nationwide Urban Runoff Program (NURP) e approvato dall'EPA's Science Advisory Board. La procedura compara la concentrazione degli inquinanti con i criteri stabiliti dall'EPA.

Gli step che segue il modello sono riassunti nella seguente Flow chart.

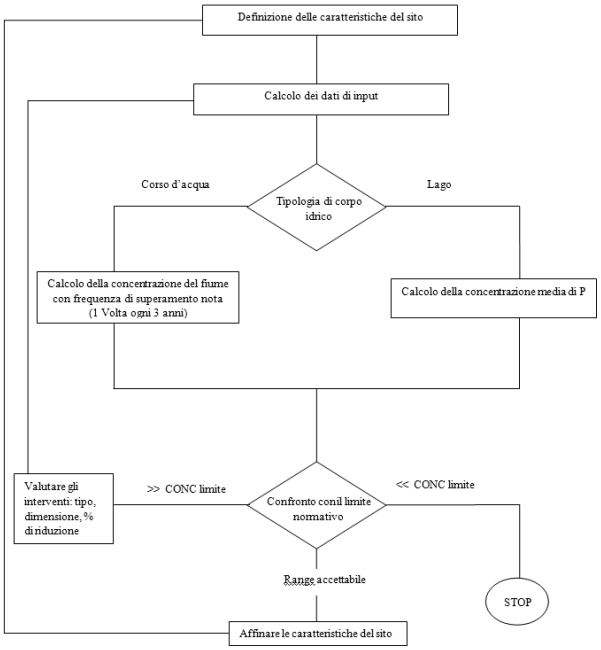


Figura 2. Flow Chart procedurale per la valutazione della qualità delle acque di ruscellamento stradale.

Per la definizione della procedura occorre descrivere in maniera sintetica i parametri di input (Tabella 3), come segue:

Area di drenaggio: è quella che contribuisce alla produzione di runoff e include la banchina destra della strada (AROW), l'area pavimentata (AHWY) e l'area totale che contribuisce con una portata aggiuntiva al flusso del corpo idrico ricettore (ATOT).

Caratteristiche dell'evento piovoso mediante analisi statistiche: Per ogni sito monitorato i ricercatori americani hanno individuato l'evento piovoso medio attraverso un'analisi statistica e suddiviso l'intero territorio statunitense in varie zone riportate in figura 3.

Ogni evento è caratterizzato dalla durata media e dal coefficiente di variazione (MDP, CVDP), dal volume medio e dal coefficiente di variazione (MVR, CVVR), dall'intensità media e dal coefficiente di variazione (MIP, CVIP) e l'intervallo di tempo tra due eventi piovosi e il relativo coefficiente di variazione (MTP, CVTP).

Il Volume medio è definito dalla equazione:

Equazione 12. Volume di runoff evento medio.

$$VR = R_v * VP$$

dove:
R_v = coefficiente di runoff medio
VP = volume di pioggia evento medio

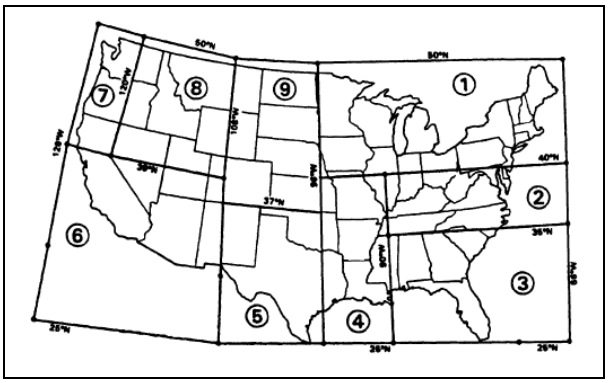


Figura 3. Suddivisione in zone del territorio statunitense per la definizione delle caratteristiche dell'evento piovoso.

Tabella 3. Nomenclatura parametri statistici rainfall/runoff.

Parametro (a)	Simbolo per ogni evento (b)	Evento medio (b)	Coefficiente di variazione (b)
Intensità o portata (L^3 / T)	q	QP, QR	CVQP, CVQR
Durata (T)	d	DP, DR	CVDP, CVDR
Volume (L^3)	v	VP, VR	CVVP, CVVR
Tempo che intercorre tra due eventi piovosi (T)	t	TP, TR	CVTP, CVTR

(a) nel caso di normalizzazione dell'intesità degli eventi, delle portate e dei volumi rispetto al bacino idrografico l'analisi dimensionale si riconduce a L/T ed L;

(b) Le lettere "P" ed "R" stanno ad indicare un evento piovoso o un parametro statistico dell'acqua di ruscellamento.

Il Tasso QR di flusso di runoff evento medio, è definito da:

Equazione 13. Tasso di flusso evento medio, (volume/tempo).

$$QR = R_v * QP * (\frac{DP}{DR})$$

dove:
QP = intensità di pioggia evento medio (volume/tempo)
DP = durata evento medio di pioggia, (time)
DR = durata evento medio runoff (time)

Indicando con MR il carico inquinante di runoff di un evento piovoso medio, definito da:

Equazione 14. Carico di inquinanti runoff evento piovoso medio (massa).

$$MR = CR * VR$$

dove:
CR = concentrazione runoff evento medio,(massa/volume)

si può determinare il valore WR del tasso di carico inquinanti runoff evento piovoso medio, con l'equazione seguente.

Equazione 15. Tasso di carico inquinanti runoff evento piovoso medio, (massa/tempo).

$$WR = CR * QR$$

Nel caso di dipendenza tra concentrazioni di inquinanti e flusso di runoff si fa riferimento alle relazioni elaborate dall'Hydroscience [1], in base alle quali le due variabili MR (volume di runoff evento medio) e WR (tasso di carico inquinanti runoff evento piovoso medio) sono determinati rispettivamente come segue:

Equazione 16. Volume di runoff evento medio.

$$MR = CR * VR * (1 + CVCR * CVVR * r_{cv})$$

Equazione 17. Tasso di carico inquinanti runoff evento piovoso medio, (massa/tempo).

$$WR = CR * QR * (1 + CVCR * CVQR * r_{cq})$$

dove:
CVCR = coefficiente di variazione concentrazione di inquinanti per l'evento medio
$\mathbf{r_{cv}}$ = coefficiente di correlazione lineare tra concentrazione di inquinanti e volume di runoff (range -1, +1)
$\mathbf{r_{cq}}$ = coefficiente di correlazione lineare tra concentrazione di inquinanti e tasso di flusso di runoff
CVVR coefficiente di variazione del volume di runoff
CVQR coefficiente di variazione del flusso di runoff

Tra le caratteristiche dell'evento piovoso è indicato inoltre, il numero medio di eventi piovosi per anno computato espresso come segue.

Equazione 18. Numero medio di eventi piovosi per anno.

$$NST = \frac{365 * 24}{MTP}$$

dove:
NST = numero di eventi piovosi per anno
MTP = intervallo medio tra due eventi piovosi (ore)

Concentrazione di inquinanti nell'acqua di ruscellamento

La concentrazione media di inquinanti nel totale volume di runoff prodotto da un evento di pioggia è descritto dalla Concentrazione media evento (EMC), mentre si indica con EMCs la quantità dei vari inquinanti connessi al singolo evento.

La Concentrazione media di inquinanti per un determinato sito (TCR espressa in mg/l), dipende dal coefficiente di variazione della concentrazione media degli inquinanti nell'acqua di ruscellamento (CVCR) relativamente a un dato sito, che nel caso statunitense è stato commisurato pari a 0,71 per una strada principale urbana, a 0,84 per una strada principale rurale ed a 0,75 in tutti i casi, e dipende altresì dal traffico e dalla tipologia di strada (principale, rurale o urbana).

Attraverso l'analisi sperimentale su un numero elevato di campioni, si è stimato un probabile valore medio di un sito per la concentrazione del piombo nell'acqua di ruscellamento pari a 0,4 mg/l per una strada principale urbana e 0,080 mg/l per una strada principale rurale. In entrambi i casi si è fatto riferimento al valore del 50-esimo percentile.

Il coefficiente di runoff (frazione di pioggia che diventa runoff) può quindi calcolarsi come segue:

Equazione 19. Coefficiente di runoff.

$$Rv = 0{,}007 * IMP + 0{,}10$$

dove:
IMP = frazione impermeabile dell'area di drenaggio (%)

Il volume medio di runoff per l'evento medio è calcolato dal prodotto del coefficiente di runoff per il volume di pioggia medio, ed a sua volta il tasso di flusso di runoff dell'evento medio è calcolato dal prodotto del coefficiente di runoff per l'intensità media di pioggia.

Dall'analisi sperimentale su strade rurali e urbane negli USA si è ottenuta un'importante relazione di regressione statistica che correla la concentrazione degli inquinanti alla densità di traffico come segue:

Equazione 20. Concentrazione media inquinanti del sito.

$$SMC = a * ADT + b$$

dove:
SMC = concentrazione media inquinanti del sito (mg/l)
ADT = traffico medio giornaliero (in migliaia di veicoli giorno)

La divisione tra questi due gruppi è stata approssimativamente fissata dal traffico giornaliero medio pari a 30.000. I valori dei coefficienti "a", "b" sono appositamente tabellati.

La concentrazione media di solidi sospesi nelle due tipologie di strade principali individuate dal monitoraggio su 51 siti americani è riportata nella figura seguente.

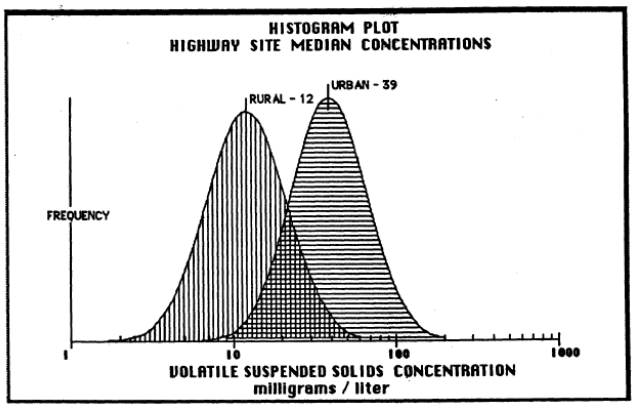


Figura 4. Concentrazione media di solidi sospesi volatili osservata nelle strade principali urbane e rurali.

Le applicazioni sperimentali in USA sono state condotte in vera grandezza ed effettuate per le determinazione di inquinanti in corpi ricettori, al fine di verificare la conformità con l'analisi teorico-statistica di base.

La procedura di analisi di impatto su un fiume è stata, per esempio, applicata per la verifica sperimentale della stima del flusso annuale medio (m^3/s) e del tasso di variazione degli inquinanti presenti nel corpo idrico ricettore.

Il flusso medio annuo del fiume (MQS) viene determinato attraverso osservazioni delle serie storiche valutando i contributi della portata idrica del fiume e di quella della strada,

mentre il coefficiente di variazione del tasso di flusso giornaliero (CVQS) prende in considerazione il tasso del valore del più basso flusso di 7 giorni in tre anni (7Q10) e del tasso di flusso annuale medio (MQS).

Per una stima iniziale si può approssimare che:

- Area Umida = 7Q10/MQS = 0,10 ÷ 0,15; CVQS = 1
- Area molto arida = CVQS = 2
- Caso generale = CVQS = 1

Le variabili utili alla determinazione della concentrazione si possono sintetizzare nelle seguenti:

- Flusso di runoff medio (QR)
- Concentrazione media di runoff (CR)
- Flusso del fiume medio (QS) in corrispondenza del punto di immissione del runoff dalla strada
- Concentrazione media del fiume (CS) in corrispondenza del punto di immissione del runoff dalla strada

A sua volta il valore della concentrazione media del fiume durante un evento può essere calcolata da:

Equazione 21. Valore della concentrazione media del fiume durante un evento.

$$CO = \frac{(QR * CR) + (QS * CS)}{QR + QS}$$

Definendo il fattore di diluizione DF come segue:

Equazione 22. Fattore di diluizione.

$$DF = \frac{QR}{QR + QS} = \frac{1}{1 + \frac{QS}{QR}} = \frac{1}{1 + D}$$

si ha:

Equazione 23. Valore della concentrazione media del fiume durante un evento sostituendo il fattore di diluizione.

$$CO = (DF * CR) + (\left[1 - DF\right] * CS)$$

Il valore di CO per un singolo evento deve quindi essere comparato con i limiti normativi.

L'applicazione del modello di diluizione probabilistico (PDM) consente di determinare la concentrazione media ed il flusso medio sia del fiume che dei runoff scaricati nel corpo idrico. La procedura si basa su 5 step:

- **STEP 1 computo statistico dei parametri di input:** vengono computati i parametri statistici di input, usando come stima il valore medio e i coefficienti di variazione del flusso del fiume e della concentrazione.

- **STEP 2 computo statistico dei parametri del fattore di diluizione:** vengono determinati i parametri statistici del fattore di diluizione.

Per l'analisi vengono valutate le variazioni standard (WQR e WQS) del flusso del fiume e del flusso di runoff, mettendo in correlazione i due valori.

La distribuzione di probabilità del fattore di diluizione (DF) è stata sviluppata calcolando la media e la deviazione standard di una log-normale e poi interpolando tra il 5% e il 95% del valore di probabilità.

Il valore del fattore di diluizione (DF) per la probabilità di percentile (a) è definito dall'equazione che segue:

Equazione 24. Valore del fattore di diluizione ad una determinata probabilità.

$$DF_a = \frac{TQR}{TQR + TQS * \exp(Z_a * WD)}$$

dove:
il valore di Z_a è preso dalla tabella di probabilità di distribuzione normale standard corrispondente al valore del percentile "a".

Noti il logaritmo della media e della deviazione standard del fattore di diluizione (DF), la concentrazione statistica è determinata con il successivo step 3.

- **STEP 3 computo statistico della concentrazione del fiume:** La media aritmetica della concentrazione dell'acqua del fiume nel punto in cui scarica il flusso di runoff dopo una completa miscelazione (MCO) è computata attraverso il valore medio delle concentrazioni (CSO) e il fattore di diluizione (MDF).

- **STEP 4 computo probabilistico della concentrazione specifica:** La probabilità che la concentrazione (CO) superi la concentrazione limite (CT) da normativa è determinata da:

Equazione 25. Probabilità che la concentrazione superi la concentrazione limite.

$$Z = \frac{\ln(CT) - UCO}{WCO}$$

- **STEP 5 correzione finale :** Quando la concentrazione di runoff rappresenta il totale di tutti gli inquinanti (solubili e non), la concentrazione del fiume viene calcolata attraverso (CO_a), la quale deve essere corretta in base alla frazione solubile degli inquinanti (FSOL) presenti nei runoff mediante l'applicazione di:

Equazione 26. Migliore stima della concentrazione di inquinanti alla frequenza a.

$$CO_a = \frac{(CO_a * FSOL)}{CORRFACTOR}$$

3 ANALISI MODELLO FHWA 1-2

Implementato il modello FHWA 1 e il modello probabilistico FHWA 2, con il presente studio si è inteso individuare una correlazione tra i due, calcolando la concentrazione media del sito per ogni inquinante con il metodo FHWA 1 e considerandola quale dato di input nel modello FHWA 2. Il valore ottenuto dovrebbe fornire la effettiva concentrazione di inquinanti nel corpo recettore. A tal fine si è proceduto a determinare la concentrazione media del sito per uno specifico inquinante, tenendo in debito conto delle variabili fondamentali dello studio, ossia le condizioni metereologiche, il volume di pioggia caduto, la durata della pioggia e l'intervallo tra una pioggia e l'altra.

Nel caso statunitense, come anticipato, è stata creata una mappa ed una banca dati rappresentativa delle effettive condizioni rilevate sperimentalmente su gran parte delle aree

osservate. Tali dati sono stati considerati i dati di input del modello FHWA 2.

Per l'analisi e la futura applicazione alla realtà siciliana, data la carenza dei dati disponibili, si è ricercato in un processo stocastico basato sul metodo di generazione di una serie N di dati artificiali, la soluzione per simulare una condizione approssimabile a quella reale.

La procedura adottata può essere riassunta come segue:

- è stato calcolato il valore medio delle caratteristiche di pioggia simulate in numero di 3000 eventi meteorici random di media fissata;
- i dati generati sono stati utilizzati come input nel modello FHWA 1 fissando le caratteristiche specifiche del sito, ovvero TGM, lunghezza di drenaggio, bacino afferente la rete di drenaggio e coefficiente di runoff;
- è stato calcolato il valore di concentrazione media degli inquinanti ST, STV, COD, BOD, Pb, Zn al variare delle condizioni specifiche del sito;
- i valori di concentrazione medi ottenuti sono stati inseriti come input nel modello FHWA 2, al fine di determinare la concentrazione di inquinanti nel corpo recettore, per il quale è stata fissata a priori la portata e l'assenza di inquinanti;
- il modello probabilistico FHWA 2 è stato implementato utilizzando la generazione artificiale di dati che ha permesso di calcolare la concentrazione di uno specifico inquinante al variare dei singoli eventi piovosi generati in maniera random.

In

Figura 5 si mette in evidenza il confronto tra la concentrazione dei solidi totali al variare del volume del generico evento piovoso per fissati valori di portata del corso d'acqua.

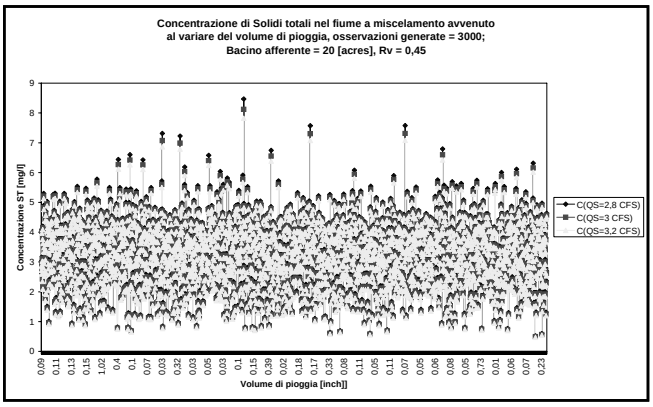


Figura 5. Variazione della quantità di solidi totali presenti nel corpo idrico ricettore al variare della lunghezza di drenaggio della portata del corso d'acqua.

Come ci si poteva attendere, dal grafico rappresentativo dei tre casi esaminati si evince che la portata del corpo recettore, per l'effetto di diluizione, è inversamente proporzionale alla concentrazione di inquinante.

Nei tre casi analizzati, il valore medio della concentrazione dei solidi totali presenti in un corpo recettore di portata pari a 3,2 – 3,8 m^3/sec è compreso tra 3,30 e 3,16 mg/l.

La simulazione, poi, di un caso in cui sono state considerati 3000 osservazioni metereologiche, un TGM pari a 20000 [V.E./g], una lunghezza di drenaggio pari a 1000 metri, è rappresentata graficamente nelle figure 6 ÷ 9 che seguono.

Dai dati analizzati sono stati ricavati i valori medi di concentrazione dei singoli inquinanti che ci si deve attendere in un corpo idrico ricettore.

Partendo dall'analisi dei modelli costruiti sulla base dell'esperienza e dei dati statunitensi, nel presente studio è stata rilevata la concentrazione media ottenuta dalla simulazione effettuata con dati approssimabili alle reali condizioni dell'area osservata nel caso di una strada extraurbana, di un bacino afferente la rete di drenaggio dell'infrastruttura stradale di dimensione pari a 20 acres (8,1 ha), di una percentuale di area impermeabile pari al 40 %, di un traffico giornaliero medio di 20.000 veicoli equivalenti giorno.

L'esito di 3000 osservazioni e la determinazione dell'inquinante presente ha restituito i seguenti dati:

- Concentrazione media di Solidi Totali = 4,2 mg/l con un bacino afferente di 20 acres (8,1 ha);
- Concentrazione media di Solidi Totali =17 mg/l con un bacino afferente di 2 acres (0,81 ha);
- Concentrazione media COD = 272 mg/l;
- Concentrazione media BOD = 24,3 mg/l;
- Concentrazione media Pb = 0,04 mg/l;
- Concentrazione media Zn = 0,09 mg/l;

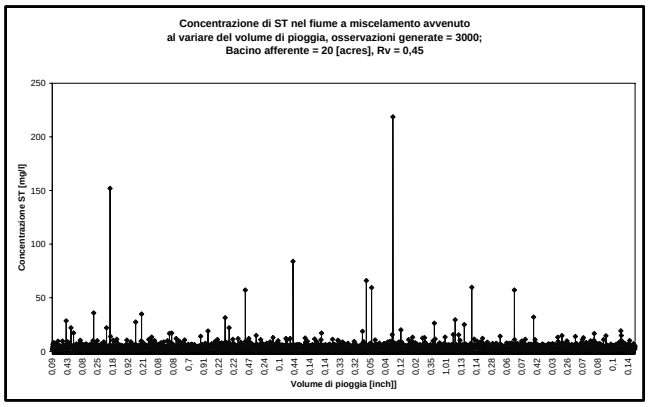


Figura 6. Variazione della quantità di volatili solidi totali volatili presenti nel corpo idrico ricettore al variare del volume di pioggia per un bacino afferente pari a 20 acres (8,1 ha).

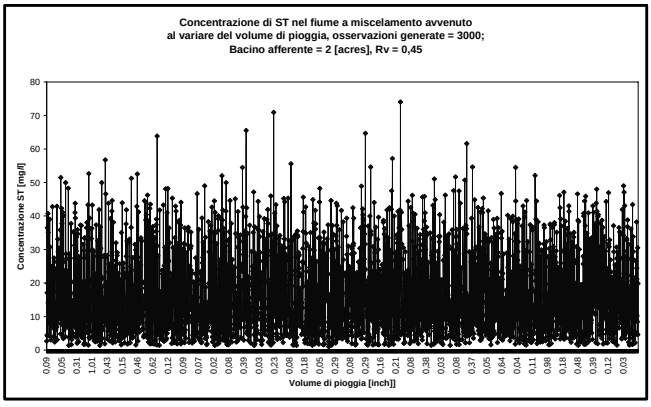


Figura 7. Variazione della quantità di solidi totali volatili presenti nel corpo idrico ricettore al variare del volume di pioggia medio per un bacino afferente pari a 2 acres (0,81 ha).

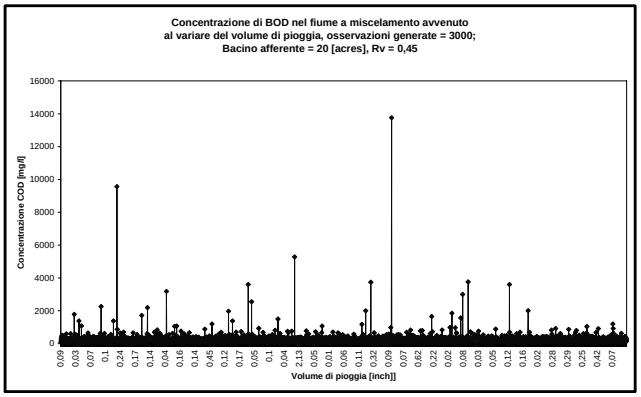


Figura 8. Variazione della quantità di COD presente nel corpo idrico ricettore al variare del volume di pioggia medio.

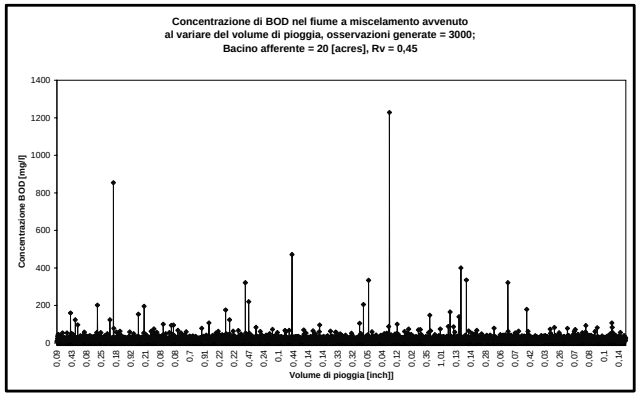


Figura 9. Variazione della quantità di BOD presente nel corpo idrico ricettore al variare del volume di pioggia.

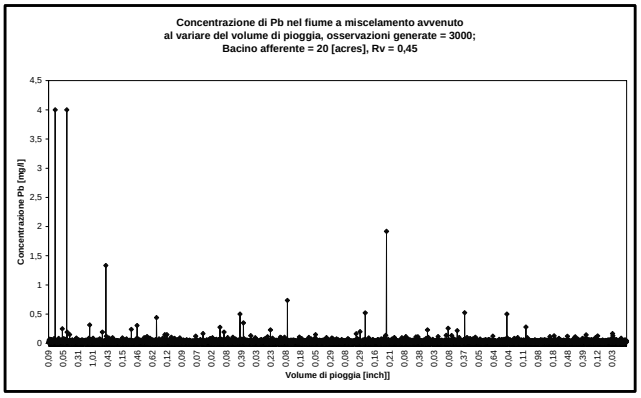


Figura 10. Variazione della quantità di Pb presente nel corpo idrico ricettore al variare del volume di pioggia.

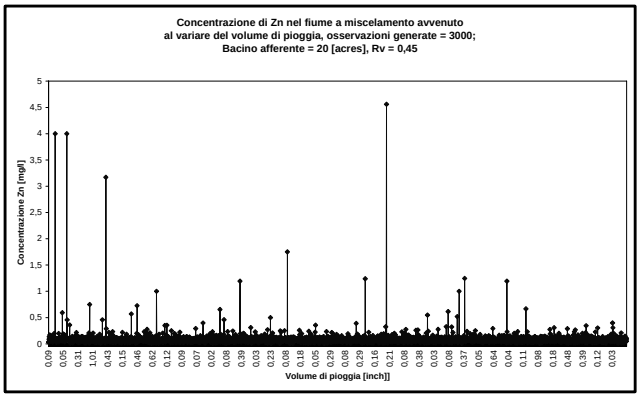


Figura 11. Variazione della quantità di Zn presente nel corpo idrico ricettore al variare del volume di pioggia.

4 CONCLUSIONI

Nell'ambito del presente lavoro è stata esaminata la metodologia statunitense di valutazione dell'impatto ambientale provocato dal dilavamento delle pavimentazioni stradali. Sono stati quindi approfonditi di due modelli FHWA.

L'approfondimento dei due modelli ha indotto a valutare la possibilità di adottare un nuovo modello generato dalla loro correlazione e la cui applicazione avrebbe potuto considerarsi rappresentativa di ogni condizione osservata.

L'impiego del primo modello ha consentito di determinare in maniera analitica la quantità attesa di inquinanti dalle acque di dilavamento della piattaforma stradale. I risultati ottenuti rappresentano i dati di input per il secondo modello che, invece, attraverso un approccio probabilistico, ha permesso di calcolare la concentrazione media dei principali inquinanti nell'acqua del generico corpo idrico ricettore.

In particolare l'unione dei due modelli e la relativa analisi del modello FHWA (1+2) ha portato a una prima valutazione con risultati quantitativi del modello che con buona approssimazione e con una taratura al parco veicolare italiano, e alle condizioni meteo-climatiche locali, può essere un valido strumento di valutazione dell'effetto ambientale generato dal dilavamento delle pavimentazioni stradali.

Il risultato ottenuto sarà approfondito in una ulteriore ricerca sperimentale che applicherà la metodologia comparando i risultati con quelli osservati sperimentalmente in corrispondenza di una area ben individuata.

5 BIBLIOGRAFIA

1. Kobriger N.P. et al, Predictive Procedure For Determinino Pollution Charatteristics in Highway Runoff FHWA/RD - 81/044
2. L.Cera et al,Trattamento e riciclaggio delle acque di ruscellamento stradale; XI Convegno Nazionale S.I.I.V 2001
3. L.Cera et al, Modello previsionale dell'inquinamento prodotto dalle acque di ruscellamento stradale nei corpi idrici ricettori, XXIII Congresso nazionale delle strade, Verona 1998
4. L.Cera et al, titolo originale: "Livelli di inquinamento delle acque di ruscellamento stradale: analisi dei metodi di calcolo", pubblicato con il titolo "Il calcolo dell'inquinamento delle acque", Le strade, 12/2000
5. Eugene D. Driscoll et al "Pollutant Loadings and impact from Stormwater runoff" Volume I: Designe procedure, FHWA-RD-88-006
6. Eugene D. Driscoll et al, "Pollutant Loadings and impact from Stormwater runoff" Volume II:Users Guide for Interactive Computer Implementation of Design Procedure. A Users Guide for an interactive computer based users-friendly version of the design procedure of document FHWA-RD-88-007
7. Eugene D. Driscoll et al, "Pollutant Loadings and impact from Stormwater runoff" Volume III:Anayitical Investigation and Research Report. FHWA-RD-88-008

360° GREEN REVOLUTION: SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DI UN'AZIENDA AGRICOLA CERTIFICATA ISO 14064

Franco Cotana[1], Sara Rinaldi[1] , Marco Barbanera[1], Lorenzo Fasola Bologna[2]

[1]Centro di Ricerca sulle Biomasse, via Duranti s.n. 06125 Perugia,
[2] ATI Monte Vibiano Vecchio, Mercatello Perugia

SOMMARIO

L'ATI Monte Vibiano Vecchio è la prima azienda agricola italiana a raggiungere un livello di emissioni di gas ad effetto serra minore di zero, avvalendosi esclusivamente di attività ed iniziative interne, senza dunque l'acquisizione di crediti di riduzione. Le emissioni sono infatti passate da 286 t CO_2 eq nel 2004 a –764 t CO_2 eq nel 2008. La Rivoluzione Verde a 360° ha portato all'implementazione ed alla attivazione di diversi interventi e tecnologie finalizzati alla diminuzione dell'impatto ambientale dell'Azienda dal punto di vista delle emissioni di GHG e al perseguimento della sostenibilità ambientale. A questo scopo è stato redatto un Inventario sulle emissioni in base a quanto disposto dalla normativa ISO 14064 e contenente le metodologie per la quantificazione, i dati, le emissioni dirette ed indirette e gli assorbimenti. Tale documento, insieme ad un Protocollo di Monitoraggio ed al Rapporto sulle Emissioni, è stato validato dalla DNV. Le verifiche effettuate da tale ente certificatore consentono di avviare un processo di miglioramento continuo sul piano della qualità, della sostenibilità e della tutela dell'ambiente.

1. INTRODUZIONE

L'Organizzazione oggetto del presente studio è un'azienda agricola situate in Umbria, l'ATI Monte Vibiano Vecchio.

Tale Azienda comprende circa 300 ettari di terreni agricoli e circa 200 di superficie boschiva.

L'Azienda vitivinicola che fa parte dell'organizzazione oggetto della rendicontazione, possiede circa 40 ettari di vigneti ed una moderna cantina provvista di sistemi che garantiscono la temperatura ottimale necessaria durante tutto il processo di vinificazione.

L'altra è un'azienda agraria fondata negli anni sessanta e che produce principalmente grano, girasole, mais, orzo.

Da alcuni anni l'Organizzazione ha deciso di mettere in atto una serie di interventi finalizzati a garantire l'autonomia energetica dell'Azienda con fonti rinnovabili e una sensibile diminuzione delle emissioni di GHG. Ha cominciato con la riconversione colturale dal 2003, da tabacco a colture cerealicole ed oleaginose che richiedono un input energetico minore. Nel presente lavoro sono state quantificate le emissioni di GHG prodotte dall'Organizzazione in base a quanto disposto dalla Norma Internazionale ISO 14064-1 [1]. Tale norma specifica i requisiti ed i principi per la quantificazione e la rendicontazione delle emissioni di gas ad effetto serra (GHG) e della loro rimozione. L'utilizzo di tale norma può aumentare la trasparenza della quantificazione, del monitoraggio e della rendicontazione dei GHG e facilitare lo sviluppo e l'attuazione di strategie e piani di gestione delle emissioni. L'Organizzazione ha deciso di quantificare le emissioni correlate con le attività produttive in base a tale Norma volontaria. L'Inventario delle Emissioni è stato validato dalla DNV (Det Norske Veritas). L'obiettivo della verifica del DNV è quello di fornire alle parti interessate alle attività svolte dall'Organizzazione un giudizio professionale e indipendente in merito ai dati ed alle informazioni attinenti al proprio inventario di gas ad effetto serra GHG, elaborato dall'organizzazione. Sono stati sviluppati i seguenti punti:

- Individuazione installazioni e scelta anno di riferimento;
- Individuazione sorgenti di emissione;
- Scelta metodologie e fattori di emissione;
- Calcolo e quantificazione;
- Valutazione dell'incertezza associata ai dati;
- Redazione di un Rapporto sulle emissioni e di un Protocollo di Monitoraggio;
- Gestione della qualità dell'Inventario.

Le verifiche effettuate da DNV consentono di intraprendere un processo di miglioramento continuo sul piano della qualità, della sostenibilità e della tutela dell'ambiente. Sono già stati completati alcuni interventi volti al raggiungimento della sostenibilità ambientale dell'Azienda. Sostenibilità intesa come capacità di realizzare i propri obiettivi economici in modo compatibile con l'ambiente e con la capacità di mantenere nel tempo qualità, tradizione, cultura legate alla propria terra.

2. INSTALLAZIONI E SORGENTI DI EMISSIONE

L'organizzazione aggrega le emissioni a livello delle installazioni che sono state individuate su cui ha il controllo finanziario ed operativo [1]. Ad ognuna di esse sono associate sorgenti ed assorbitori di GHG.

2.1 Cantina

Tale installazione è costituita dall'edificio della cantina e dalla casa del custode. Le emissioni legate a tale installazione sono dirette, dovute alla combustione di gas naturale

nell'impianto di riscaldamento, alla fermentazione del vino e alle perdite di gas refrigerante, ed indirette determinate dal consumo di energia elettrica.

2.2 Centro aziendale

È costituito dalle strutture amministrative, dagli uffici e dall'officina; le emissioni rendicontate sono imputabili al consumo di gas naturale, alle fuoriuscite di gas refrigerante dalle macchine frigorifere e al consumo di energia elettrica.

2.3 Parco macchine

Sono state aggregate tutte le attrezzature ed i mezzi necessari per lo svolgimento delle attività; nella presente installazione sono state quantificate le emissioni derivanti dalla combustione di gasolio agricolo agevolato nei mezzi e consumo di energia elettrica.

2.4 Campi

Nell'installazione Campi sono compresi tutti i terreni coltivi e le superfici boschive dell'Organizzazione: le emissioni di GHG legate a tale installazione sono dovute essenzialmente all'impiego di fertilizzanti azotati, siano essi chimici o organici. Nella presente installazione sono presenti gli assorbitori, vigneti e boschi.

2.5 Forni Tabacco

Per quanto riguarda l'installazione Forni Tabacco, sono state rendicontate le emissioni dirette legate alla combustione di gas naturale nei forni per l'essiccazione del tabacco e quelle indirette dovute al consumo di energia elettrica. Dal 2003 è stata effettuata una riconversione colturale, da tabacco ad altre colture cerealicole ed oleaginose, che ha portato alla dismissione dei forni nel 2007; le emissioni associate a tale installazione, dal 2007 in poi, sono pari a zero.

In Fig.1 sono individuate le installazioni.

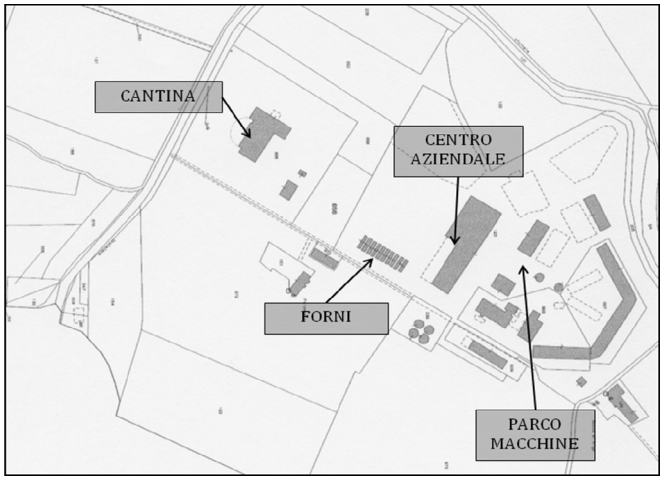


Figura 1: Installazioni all'interno dell'Organizzazione

3. METODOLOGIE IMPIEGATE PER IL CALCOLO DELLE EMISSIONI

3.1 Emissioni indirette

Le emissioni indirette sono definite come le emissioni derivanti dalla generazione di elettricità, calore e vapore importati e consumati dall'Organizzazione. Per l'Azienda in esame, le emissioni indirette derivano dal consumo di energia elettrica.

3.1.1 Energia Elettrica

In accordo con la metodologia IPCC [2] e sulla base dei dati disponibili, le emissioni di CO_2eq derivanti dal consumo di energia elettrica sono state calcolate impiegando la seguente relazione (equazione 2.1 del manuale [2]):

$$Q = E * F_{EN} \quad (1)$$

dove:
Q: quantitativo di GHG emessi (grammi CO_2eq);
E: consumo di energia elettrica rilevato dalle fatture Enel Energia – Mercato Libero dell'Energia (kWh);
F_{EN}: fattore di emissione (grammi di CO_2 emessa/kWh netto fornito alla rete Terna) [3].

Sono state quantificate le emissioni di GHG da consumo di energia elettrica per le installazioni Cantina, Centro Aziendale, Forni, Parco Macchine. I fattori di emissione tengono conto del mix produttivo del Parco Elettrico Italiano.

3.2 Emissioni dirette

Le emissioni dirette derivano da impianti, sistemi energetici, veicoli, etc.. di proprietà o controllati dall'azienda stessa. In questo studio sono considerate le emissioni derivanti dalla combustione di gas naturale e di gasolio agevolato, dalla fermentazione del vino, dall'impiago di fertilizzanti azotati e dalle eventuali perdite di gas refrigerante negli impianti di climatizzazione dell'Azienda.

3.2.1 Combustione gas naturale

Nell'azienda sono presenti tre punti di consegna del gas: uno nell'installazione Cantina, uno nel Centro Aziendale ed uno per l'alimentazione dei Forni per l'essiccazione del tabacco.

La metodologia generale per la stima delle emissioni dalla combustione del gas naturale è quella fornita nell'IPCC [1], seguendo il livello di approccio 1 e assumendo un fattore di ossidazione pari a 1 (Eq.2).

$$Q_i = S * P.C.I * EF_i * C \quad (2)$$

dove:
Q_i: quantitativo di sostanza emessa (kg);
S:consumo di combustibile fornito da Enel (Sm^3);
P.C.I.: potere calorifico inferiore (kJ/Sm^3) [4];
C: coefficiente di ossidazione [1];
EF_i: fattore di emissione per l'i-esima sostanza (56100 kg CO_2/TJ; 0.1 kg N_2O /TJ, 5 kg CH_4/TJ [1]);
i: inquinante emesso (CO_2, N_2O o CH_4).

Il quantitativo di CO_2 equivalente totale (CO_2eq), espresso in tonnellate, è stato determinato moltiplicando le emissioni Q_i per i relativi potenziali di riscaldamento globale per un orizzonte temporale di 100 anni (GWP_i), dedotti dall'Appendice C della UNI ISO 14064-1, come espresso nell'Eq. (3):

$$CO_2eq = Q_{CO2} * GWP_{CO2} + Q_{N2O} * GWP_{N2O} + Q_{CH4} * GWP_{CH4} \quad (3)$$

dove:
Q_{CO2}: quantitativo di CO_2 emesso (t);

Q_{N2O}: quantitativo di N_2O emesso (t);
Q_{CH4}: quantitativo di CO2 emesso (t).

3.2.2 Fermentazione del vino

Il metodo di calcolo è basato sull'Eq.(4), in cui lo zucchero contenuto nell'uva è trasformato in etanolo con rilascio di anidride carbonica:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2 \quad (4)$$

Le emissioni sono state calcolate applicando un modello [5], che richiede come dati di input il quantitativo totale di uva lavorata annualmente, il tasso di estrazione tipico del mosto dall'uva lavorata ed il relativo contenuto in zucchero espresso in gradi Baumè. Il modello richiede inoltre l'introduzione dei dati relativi all'eventuale quantitativo di succo aggiunto per ottimizzare la fermentazione nonché al residuo zuccherino contenuto nel vino prodotto. Dal momento che l'Azienda produce vino rosso, è necessario considerare anche le emissioni prodotte dalla fermentazione malolattica: durante tale processo l'acido malico si trasforma in acido lattico ed anidride carbonica. Introducendo nel modello il quantitativo di acido malico presente nell'uva, è possibile calcolare la CO_2 prodotta mediante l'Eq. (5):

$$CO_2 \text{ prodotta} = 0.33 \bullet (\text{Massa di acido malico}) \quad (5)$$

3.2.3 Impiego fertilizzanti azotati

Il calcolo delle tonnellate di anidride carbonica emesse dall'operazione di fertilizzazione è stato effettuato seguendo le direttive fornite dall'IPCC [6]. È stato pertanto necessario valutare il quantitativo di azoto organico ed azoto sintetico impiegato dall'Azienda annualmente nella fertilizzazione dei campi. Una valutazione a parte è stata effettuata per l'urea, in quanto è stato necessario considerare, oltre alle emissioni dirette ed indirette di ossido di diazoto, la quantità di anidride carbonica fissata durante il processo industriale di produzione e persa durante la distribuzione di urea nel terreno nella fase di fertilizzazione.

Semplificando l'equazione 1.11 di [6] in base alla tipologia di Azienda, è possibile calcolare le emissioni dirette di ossido nitroso mediante l'Eq. (6):

$$N_2O - N_{DIR} = [(F_{SN} + F_{ON}) * EF_1] \quad (6)$$

dove

F_{SN} : quantitativo annuale di azoto sintetico applicato ai terreni (kg N/anno);

F_{ON} : quantitativo annuale di azoto da letame animale, compost, fanghi di depurazione e da altri materiali organici (kg N/anno);

EF_1 : fattore di emissione per le emissioni di ossido nitroso da N_{DIR} [0.01kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$].

Sono state valutate le emissioni indirette da lisciviazione $N_2O_L - N$ e da volatilizzazione $N_2O_{ATD} - N$ applicando la metodologia descritta in [6].

La valutazione delle emissioni di CO_2 dovute all'impiego di urea è stata effettuata tramite l'Eq.(7) (equazione 11.13 di [16]):

$$CO_2 - C_{Emission} = M \cdot EF \quad (7)$$

dove:

$CO_2 - C_{Emission}$: emissioni annuali di C dovute all'impiego di urea [ton C (anno)$^{-1}$];

M: quantitativo annuale di urea utilizzato [ton urea (anno)$^{-1}$];

EF: fattore di emissione [0.20 ton C (ton urea)$^{-1}$].

Moltiplicando per 44/12, si convertono le emissioni totali di CO_2-C in emissioni di CO_2.

Infine il quantitativo di CO_2 eq totale (CO_2 eq) è stato determinato moltiplicando le emissioni di N_2O e di CO_2 per i relativi potenziali di riscaldamento globale (Eq. 8) per un orizzonte temporale di 100 anni (GWP_i), dedotti dall'Appendice C della UNI ISO 14064-1.

$$CO_2eq = CO_2 * GWP_{CO2} + N_2O_{DIR} * GWP_{N2O} + N_2O_{ATD} * GWP_{N2O} + N_2O_L * GWP_{N2O} \quad (8)$$

3.2.4 Combustione Gasolio agricolo

Le emissioni sono state calcolate a partire dai quantitativi annui assegnati di gasolio, che rappresentano un dato accurato seppur non frazionato tra i diversi macchinari. In accordo con la metodologia IPCC [1] relativa al livello di approccio 1 delle fonti mobili, le emissioni di CO_2, N_2O e CH_4 sono state calcolate applicando l'Eq. (9):

$$Q_i = F * EF_i \quad (9)$$

dove:

Q_i: quantitativo di sostanza emessa (kg);

F: quantitativo di carburante impiegato (TJ);

EF_i: fattore di emissione (74100 kg CO_2/TJ, 4.15 kg CH_4 /TJ, 28.6 kg N_2O/TJ [1]);

i: inquinante emesso (CO_2, N_2O o CH_4).

Per esprimere i quantitativi di gasolio impiegato nei macchinari in termini di contenuto energetico, espresso in TJ, si è applicata la seguente espressione:

$$F = \frac{L * \rho * PCI}{1 * 10^6} \quad (10)$$

dove:

L: quantitativo di gasolio assegnato annualmente dall'UMA (in litri);

ρ: densità del gasolio (0.8325 kg/l, rappresenta il valor medio dell'intervallo di variabilità (0.82-0.845 kg/l) comunicato dal fornitore di gasolio agricolo;

PCI: potere calorifico inferiore del gasolio (43.0 TJ/Gg) [1].

Infine il quantitativo di CO_2eq totale (CO_2eq) è stato determinato tramite l'Eq. (11) moltiplicando le emissioni Q_i per i relativi potenziali di riscaldamento globale per un orizzonte temporale di 100 anni (GWP_i).

$$CO_2eq = Q_{CO2} * GWP_{CO2} + Q_{N2O} * GWP_{N2O} + Q_{CH4} * GWP_{CH4} \quad (11)$$

3.2.5 Perdite gas refrigerante

Nel periodo considerato, dal 2003 fino al 2008, non sono state effettuate ricariche di refrigerante R407C nelle macchine frigorifere; pertanto le emissioni di gas refrigerante sono state assunte nulle.

3.3 Assorbimenti

La ISO 14064 definisce assorbitore un'unità fisica o un processo che rimuove un GHG dall'atmosfera, Nel caso dell'Organizzazione, possono essere considerati assorbitori il vigneto (circa 40 ha) ed il bosco di proprietà dell'azienda (circa 200 ha).

3.3.1 Vigneto

L'assorbimento di CO_2 da parte dei vigneti è stato determinato applicando il modello descritto in [5], in cui si assume che sia noto il contenuto di zucchero dell'uva alla raccolta e la quantità di uva lavorata annualmente. Utilizzando l'Eq. (12), che descrive il processo di fotosintesi, viene determinato il quantitativo di CO_2 necessario per produrre lo zucchero:

$$CO_2 + 12\ H_2O + \text{fotoni} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 6\ H_2O \qquad (12)$$

Lo zucchero comunque è soltanto uno dei prodotti della fotosintesi, in quanto occorre considerare anche la crescita dei grappoli, dei rami, delle strutture permanenti e delle radici della pianta, i quali a loro volta sono assorbitori di CO_2. Il modello assume che la massa della radici sia pari al 25% della biomassa in piedi, con un contenuto di carbonio del 48%, e che parte del carbonio delle potature sia immagazzinato nel suolo (45%) e parte sia emesso come CO_2 a causa del processo di decomposizione (55%). Si assume inoltre che il sequestro di CO_2 avvenga nel frutto, nelle strutture permanenti, nell'apparato radicale e parzialmente nel terreno, grazie alla decomposizione aerobica delle potature.

3.3.2 Boschi

Per valutare il bilancio netto tra emissioni e assorbimento di CO_2, la metodologia IPCC si basa sull'assunzione che i cambiamenti dello stock di carbonio in un ecosistema avvengano principalmente attraverso lo scambio di CO_2 tra la superficie terrestre e l'atmosfera, assumendo, ad esempio, la lisciviazione trascurabile. In questo modo un aumento dello stock di carbonio nel tempo equivale ad una rimozione netta di CO_2 dall'atmosfera e una diminuzione dello stock ad un'emissione netta in atmosfera.

La variazione dello stock di carbonio è stata elaborata per la biomassa, mentre sono stati esclusi i contributi nella lettiera e nel suolo, in quanto non si dispone di dati sulla gestione degli stessi. È stato utilizzato il metodo "Gain Loss", in cui la variazione dello stock di carbonio è calcolato come differenza tra il carbonio fissato nella biomassa vegetale durante l'accrescimento annuale e il carbonio della biomassa rimossa, come espresso nell'Eq. (13):

$$\Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L \qquad (13)$$

dove
ΔC_B: variazione annuale dello stock di carbonio nella biomassa (t_C/anno);
ΔC_G: incremento annuale dello stock di carbonio dovuto alla crescita della biomassa (t_C/anno);
ΔC_L: decremento annuale dello stock di carbonio dovuto alla perdita di biomassa (t_C/anno).

L'incremento annuale della biomassa forestale è stato calcolato a partire dall'Eq. (14) (equazione 2.9 di [6]):

$$\Delta C_G = \sum_i (A_i \cdot G_{TOTi} \cdot CF_i) \qquad (14)$$

dove:
A_i: area di una tipologia forestale (ha);
$G_{TOT\,i}$: crescita media della biomassa totale (t_{ss}/anno);
CF_i : frazione di carbonio nella sostanza secca (t_C/t_{ss});
i: sSpecie forestale.

La crescita media della biomassa totale è ricavata mediante l'Eq. (15) [6]:

$$G_{TOTi} = \sum \{I_V \cdot BCEF_I \cdot (1+R)\} \qquad (15)$$

dove:
I_V: incremento medio annuale per una specifica vegetazione (m^3/(ha per anno));
$BCEF_I$: Fattore di conversione ed espansione per la conversione in biomassa epigea partendo dall'incremento annuale netto in volume($t_{biomassa\ aerea}/m^3$di incremento);
R: rapporto tra massa ipogea e massa epigea.

I dati necessari per l'implementazione di tale metodologia sono stati estrapolati dalla Relazione dettagliata sullo stato dei boschi di proprietà dell'azienda, effettuata da esperti forestali proprio per garantire la più precisa rispondenza del calcolo alla realtà, diminuendo l'incertezza nella valutazione dell'assorbimento.

4. RISULTATI

L'applicazione delle metodologie sopra descritte ha permesso di quantificare sia le emissioni prodotte dall'Azienda sia l'incertezza associata a tale dato. Complessivamente si assiste ad una netta diminuzione delle emissioni che passano da 286 t CO_2 eq nel 2004 a -764 t CO_2 eq nel 2008 (Fig.2).

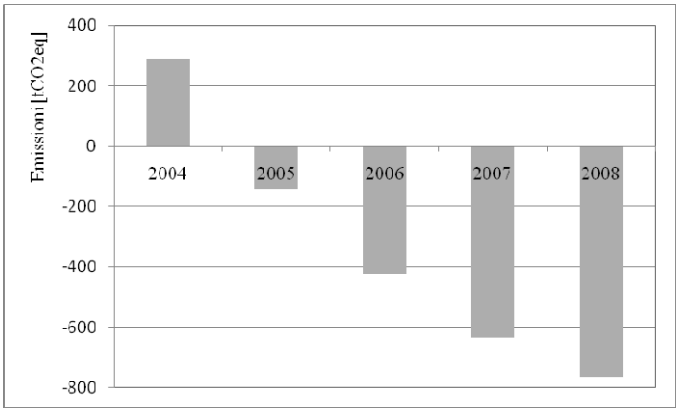


Figura 2: Andamento delle emissioni di GHG da 2004 al 2008

Tale netta diminuzione è dovuta in primis alla riconversione colturale effettuata. Infatti dal 2003 è diminuita la produzione di tabacco e di conseguenza il consumo energetico legato all'essiccazione di tale coltura. In Fig. 3 è riportato l'andamento delle emissioni relative all'installazioni Forni: dal 2007 sono stati dismessi e ciò ha garantito una diminuzione delle emissioni totali dell'azienda.

Per quanto concerne le emissioni prodotte dal Parco Macchine, si delinea anche in questo caso un andamento decrescente. Si denota in particolare un marcato decremento per l'anno 2008, dovuto sostanzialmente ad una diminuzione nel consumo di gasolio e all'impiego di biodiesel nei nuovi trattori di cui si è dotata l'azienda. Per il Parco Macchine si passa da 305 tCO_2eq nel 2004 a 120 tCO_2 eq nel 2008.

Le emissioni del Centro Aziendale restano pressoché costanti nel corso degli anni e non hanno un peso rilevante nel totale delle emissioni.

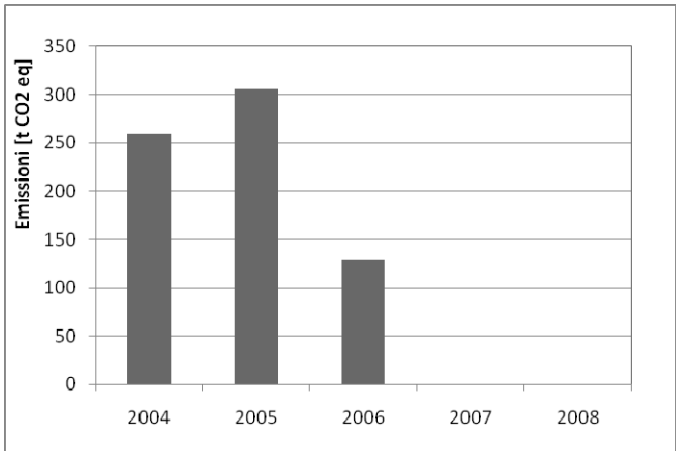


Figura 3: Emissioni relative all'installazione Forni

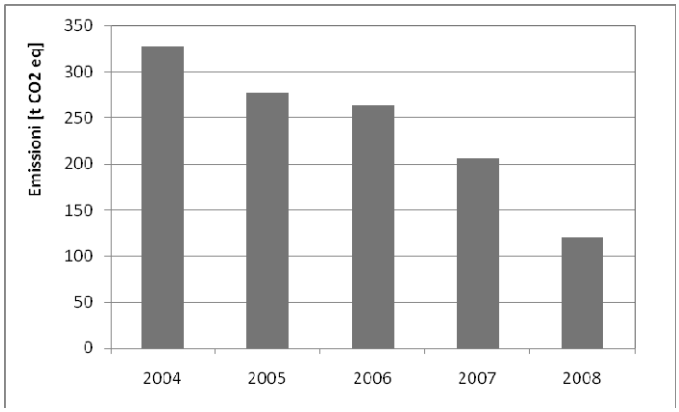


Figura 4: Emissioni relative all'installazione Parco Macchine

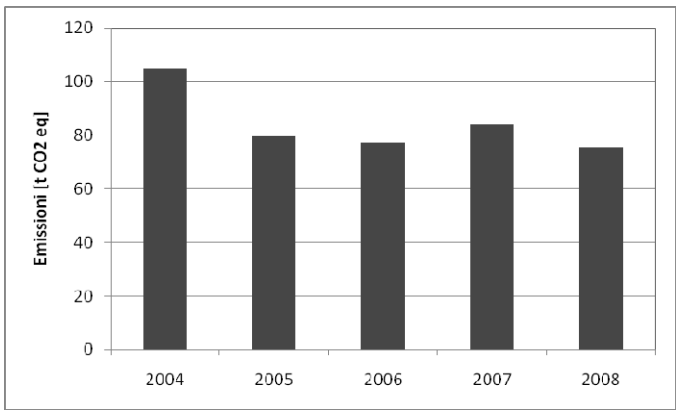


Figura 5: Emissioni relative all'Installazione Cantina

Per quanto concerne l'installazione Cantina, le emissioni sono strettamente connesse alla produzione di uva e di vino. Il 2004 presenta il massimo delle emissioni che superano le 100 t CO_2 eq, mentre negli anni seguenti le emissioni si attestano intorno alle 80 t CO_2 eq.

Nell'installazione Campi le emissioni sono dovute essenzialmente all'impiego dei fertilizzanti azotati e alla rimozione e taglio di legna dai boschi. In tale installazione sono presenti i boschi ed i vigneti ed è per questo che non si può parlare di emissioni ma di assorbimenti come si evince dal grafico di Fig. 6.

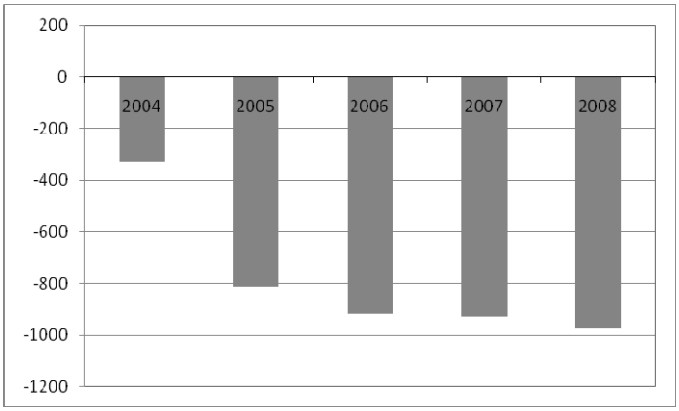


Figura 6: Emissioni (Assorbimenti) relative all'Installazione Campi

5. INTERVENTI AMBIENTALMENTE SOSTENIBILI

L'ATI Monte Vibiano Vecchio, sulla base dell'Inventario delle emissioni e delle linee guida dettate dalla Norma ISO 14064-2, ha individuato degli interventi che possono portare ad un miglioramento al livello di impatto ambientale dell'Azienda. Nonostante il bilancio delle emissioni sia in credito, l'azienda ha concluso e sta ancora investendo in interventi che interessano tutti i settori connessi all'Azienda: dall'energia rinnovabile, alla razionalizzazione dei trasporti aziendali, all'efficienza ed al risparmio energetico, all'impiego di fertilizzanti a minore impatto ambientale, alla conduzione boschiva e alla gestione forestale, all'introduzione di misure di Green IT negli uffici (spegnimento di server energivori, carta riciclabile, riduzione stampanti). Una politica ambientale che interessa l'Azienda a 360°.

Sono già stati installati i pannelli fotovoltaici integrati nelle superfici esterne di strutture edilizie di proprietà dell'azienda in sostituzione di coperture in cemento-amianto (Fig. 8) per una potenza complessiva di picco pari a 50 kWp. Tali pannelli producono circa il 60% dell'energia consumata nell'Azienda: nei prossimi mesi verrà ampliato tale impianto al fine di produrre energia elettrica sufficiente a soddisfare la richiesta totale di energia elettrica.

L'azienda si è dotata inoltre di un distributore solare, il primo installato in Italia, e di una serie di veicoli elettrici per gli spostamenti all'interno dell'azienda. In tale impianto (Fig.7), l'energia elettrica è prodotta dal pannello fotovoltaico ad inseguimento su due assi di potenza pari a 7,5 kW_p e immagazzinata in una batteria, in cui un elettrolita al vanadio permette di mantenere la carica riducendo al minimo le perdite; tale energia è impiegata per l'alimentazione dei veicoli elettrici.

I tetti dei silos per lo stoccaggio dei cereali sono stati dipinti con una speciale vernice ad elevata albedo (Fig. 8); per verificare le effettive proprietà riflettenti di tale materiale sono stati effettuati diversi test in laboratorio ed è stato rilasciato un certificato che attesta che la superficie dei tetti dei silos compensa circa 25 t di CO_2 immesse in atmosfera, calcolate mediante un metodo matematico che permette di valutare l'effetto del coefficiente di riflessione medio della terra sulla temperatura globale e la superficie riflettente equivalente ad una tonnellata di CO_2 immessa nell'atmosfera.

Si sta attuando inoltre la progressiva sostituzione dei trattori e delle macchine motrici tradizionali con altri alimentati a biodiesel. Attualmente in Azienda sono presenti tre trattori a biodiesel derivante da colture oleaginose, ovvero di I generazione. Lo sviluppo futuro in questo settore è l'impiego

di biocarburanti di II generazione e di conseguenza la sostituzione di tutto il parco macchine.

L'uso di fertilizzanti organici azotati in sostituzione di quelli chimici è stato avviato nei vigneti, in cui circa l'80% dei fertilizzanti impiegati è di origine organica; tale sostituzione verrà progressivamente applicata a tutti i terreni coltivi.

La conservazione del patrimonio boschivo aziendale è un ulteriore intervento che l'azienda sta portando avanti tramite azioni che ne conservino lo stato e migliorino la conduzione; inoltre L'organizzazione sta procedendo con l'acquisizione in gestione di altre superfici boschive, ora abbandonate, al fine di avviarle ad una corretta gestione che le salvaguardi. L'azienda inoltre adotta da anni una politica di ottimizzazione dei trasporti, indirizzando ad esempio la scelta verso collaboratori e lavoratori che abitano a breve distanza dall'azienda.



Figura 7: Distributore solare



Figura 8: Coperture silos ad elevato albedo ed impianto fotovoltaico

6. CONCLUSIONI

L'ATI ha deciso nel 2003 di avviare un percorso sostenibile che potesse portare progressivamente alla riduzione dell'impatto ambientale, in termini di emissioni di gas serra. Per dimostrare a livello quantitativo i risultati di tale percorso, è stato redatto un Protocollo di Monitoraggio ed un Rapporto sulle emissioni in base a quanto disposto dalla ISO 14064, norma internazionale che fornisce strumenti per la quantificazione e la rendicontazione delle emissioni di gas serra. Tale documentazione è stata validata da DNV, ente certificatore esterno. Analizzando i risultati, si evidenzia nel corso degli anni una netta diminuzione delle emissioni di gas serra, arrivando nel 2008 a valori ben al di sotto dello zero.

L'Azienda ATI Monte Vibiano Vecchio rappresenta quindi un esempio di come perseguire un'agricoltura sostenibile, in un percorso di miglioramento che comprende tutte le attività dell'azienda: dal modo di produrre e utilizzare l'energia, alla coltivazione e fertilizzazione dei campi, ai trasporti all'interno dell'azienda con mezzi a basso impatto ambientale.

Per perseguire un'agricoltura sostenibile è necessario minimizzare i costi, siano essi ambientali, economici o sociali e massimizzare le rese e la conservazione dell'ambiente.

7. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia DNV per il supporto professionale e la collaborazione nella realizzazione di tale progetto ed il personale dell'ATI Monte Vibiano Vecchio per la disponibilità e la viva partecipazione nel raggiungimento degli obiettivi della 360° Green Revolution.

8. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. UNI ISO 14064 "Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals.
2. IPCC, "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" - Volume 2 Energy, 2006.
3. Rapporti Ambientali Enel – Tabella Indicatori del Bilancio Ambientale Italia.
4. Bollettino di analisi relative al gas naturale mensile dell'impianto REMI 34696201 di Marsciano –Perugia- fornito da SNAM Rete Gas.
5. Provisor, Greenhouse Gas Accounting Protocol for the International Wine Industry – Version 1.1, 2008.
6. IPCC, "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" - Volume 4 Agricolture, Forestry and Other Land Use, 2006.

SESSIONE

FONTI E SISTEMI ENERGETICI

AUTORIZZAZIONE DI IMPIANTI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE RINNOVABILE: PROCEDURE E CRITICITÀ

Elisabetta Barbieri, Franca Stragapede, Alessandro Conte

Provincia di Genova – Direzione Ambiente ed Energia, Largo Cattanei, 3 – 16147 Genova
e-mail: ufficio.rumore@provincia.genova.it

SOMMARIO

La normativa vigente prevede che gli impianti di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile siano autorizzati dalla Provincia competente per territorio. Lo strumento procedurale è quello dell'Autorizzazione Unica. In questo lavoro sono presentate le principali criticità e problematiche che sono state affrontate dalla Provincia di Genova nello svolgimento dei procedimenti di autorizzazione di diverse tipologie di impianto (fotovoltaico, eolico, biogas, idroelettrico, cogenerazione).

1 L'AUTORIZZAZIONE UNICA

La Legge della Regione Liguria n. 22/2007, con le sue successive modifiche e integrazioni (L.R. 16/2998 e L.R. 45/2008), attribuisce alla Provincia le competenze per il rilascio dell'Autorizzazione Unica (AU) per la costruzione e l'esercizio di impianti che producono energia elettrica da fonte rinnovabile e per le opere connesse e le infrastrutture indispensabili.

Il percorso autorizzativo si svolge attraverso lo strumento della conferenza dei servizi, a cui sono invitati a partecipare tutti gli Enti che hanno competenza nei diversi aspetti inerenti il progetto, affinché possano rilasciare i pareri che poi confluiscono nell'unico provvedimento autorizzativo provinciale. L'Autorizzazione Unica, quindi, assorbe ogni altra autorizzazione in qualsiasi campo: ambientale, paesaggistico, edilizio, urbanistico, demaniale, interferente (ad esempio per le linee elettriche), relativo alla sicurezza (ad esempio in relazione al sorvolo a bassa quota), nonché l'eventuale apposizione del vincolo preordinato all'esproprio (si veda la Tabella 1 per un elenco delle autorizzazioni e dei nulla osta di più frequente recepimento).

Rispetto ad altri tipi di autorizzazione rilasciati dalla Provincia, come ad esempio l'Autorizzazione Integrata Ambientale (nota anche come IPPC – Integrated Pollution Prevention and Control), che per il rilascio prevede lo stesso percorso amministrativo, l'Autorizzazione Unica può quindi risultare più complessa, poiché è necessario considerare non solo gli aspetti ambientali dell'impianto in progetto, ma anche gli aspetti relativi alla costruzione sia dell'impianto, che delle opere connesse (ad esempio strade di accesso al sito, linee elettriche interrate, ecc.).

Secondo la normativa la prima conferenza dei servizi (referente) deve essere convocata entro 30 giorni dal ricevimento della domanda da parte del Proponente il progetto. Al procedimento di Autorizzazione Unica, inoltre, è prevista la partecipazione del pubblico e dei portatori di interesse, che si attua tramite la consultazione del progetto e la presentazione di osservazioni a seguito di avviso pubblico.

Tabella 1 – Alcune Autorizzazioni / Nulla osta più frequenti da recepire

Tema	Atto da recepire	Ente
Paesaggio	Nulla Osta	Comune o Provincia o Regione
Rumore	Nulla Osta	Comune
Edilizia	Permesso	Comune
Edilizia	Autorizzazione alla costruzione di sopraelevazioni	Provincia
Atmosfera	Autorizzazione alle emissioni	Provincia
Sicurezza	Parere di conformità	Vigili del Fuoco
Idrogeologico	Provvedimento	Comunità Montana o Provincia
Impatto ambientale	Provvedimento	Regione
Sorvolo aereo	Nulla Osta	ENAC/ENAV
Sorvolo aereo	Nulla Osta	Aeronautica militare
Demanio	Nulla Osta	Enti Preposti
Linee elettriche	Nulla Osta	Ministero dello Sviluppo Economico Comunicazioni

Il tempo massimo per il rilascio dell'Autorizzazione Unica è per legge di 180 giorni al netto delle sospensioni necessarie.

Le causa più frequente di sospensione del procedimento riguarda la richiesta di presentazione di approfondimenti inerenti vari aspetti del progetto.

Un'altra possibile causa di sospensione del procedimento è dovuta alla necessità di sottoporre il progetto alla Valutazione di Impatto Ambientale regionale (VIA).

Il procedimento viene riaperto al momento della presentazione della documentazione richiesta o, nel secondo caso, dell'emissione da parte della Regione Liguria del positivo Decreto di VIA.

Dopo l'esame delle integrazioni da parte degli Enti interessati, viene convocata la seconda conferenza dei servizi (deliberante). In presenza di tutti i pareri necessari con espressione positiva, o in assenza di motivati dinieghi, il progetto può essere approvato e quindi viene emesso il Provvedimento Dirigenziale che autorizza il proponente alla costruzione dell'impianto e delle opere accessorie.

Nel caso l'impianto sia costruito in zona vincolata, la Soprintendenza per i beni paesaggistici ed architettonici deve apporre il visto di legittimità sul provvedimento emesso; nel caso non si esprima esplicitamente è necessario attendere 60 giorni prima dell'inizio dei lavori di costruzione. D'altra parte in una logica di semplificazione procedurale la Soprintendenza viene sempre invitata alla conferenza dei servizi e già in questa sede spesso si esprime favorevolmente.

Il procedimento di Autorizzazione Unica potrebbe dover contenere anche gli atti propedeutici per l'apposizione del vincolo preordinato all'esproprio, nel caso in cui il proponente ne abbia fatto esplicita richiesta: gli impianti che producono energia da fonte rinnovabile, infatti, sono definiti dalla normativa "indifferibili ed urgenti", pertanto è facoltà del proponente richiedere anche il vincolo preordinato all'esproprio nel caso tutto o parte dell'impianto sorga in terreni di proprietà altrui.

Le criticità di tipo amministrativo, riscontrate nel rilascio di provvedimenti di autorizzazione unica, sono causate anche dalle leggi vigenti in materia che, a volte, si sovrappongono o non risultano coordinate e coerenti fra loro e che prevedono una molteplicità di Enti per coprire le diverse competenze.

A queste criticità si possono sovrapporre problematiche di tipo tecnico, per la difficoltà di previsione di alcuni aspetti dovuti alla novità degli impianti.

In questo lavoro sono analizzate le criticità riscontrate e le soluzioni che sono state adottate per risolverle.

2 STATO DI FATTO NELLA PROVINCIA DI GENOVA

Il Servizio Energia della Provincia di Genova dal 2006 al 2009 ha svolto 28 istruttorie di Autorizzazione Unica, autorizzando 22 impianti, pari ad una potenza totale massima di 30 MW, per una produzione annua attesa di energia pari a 180.000 GJ (ovvero 58.000 MWh/a).

La suddivisione per tipologia di impianto è la seguente: 18 fotovoltaici (potenza pari a 3 MW complessivi), 4 eolici (5,9 MW), 1 biogas (0,26 MW), 1 idroelettrico (21 MW).

Nella Figura 1 è visualizzata la suddivisione per categoria degli impianti che sono stati autorizzati o di cui è in corso il rilascio dell'autorizzazione.

In Figura 2 sono rappresentate le pratiche che sono state istruite nei diversi anni. Non sono stati rappresentati gli impianti che hanno richiesto istanza di autorizzazione, ma non sono poi stati approvati poiché non hanno superato la valutazione di impatto ambientale.

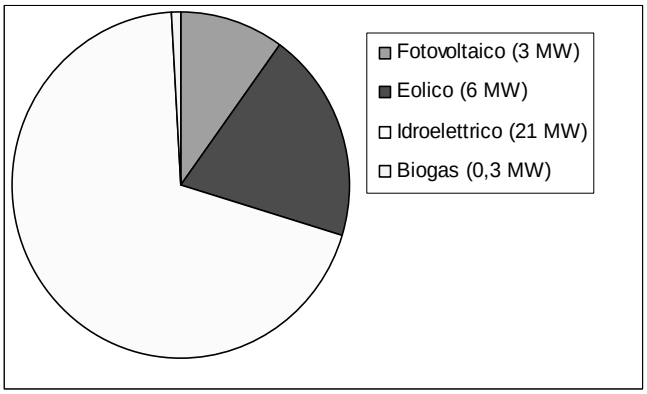


Figura 1 – Potenze autorizzate (e in via di autorizzazione) in MW

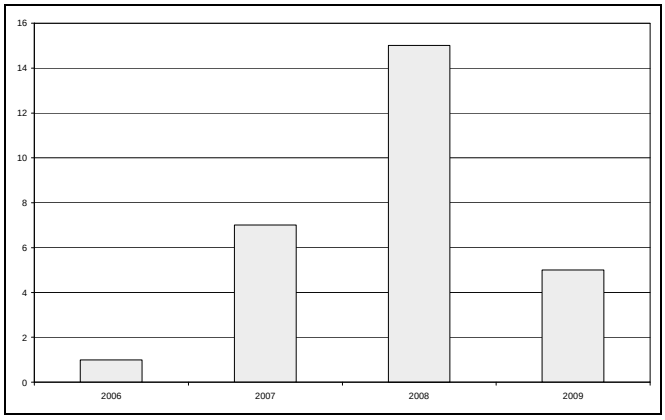


Figura 2 – Numero delle pratiche pervenute nei diversi anni

La normativa regionale per l'autorizzazione di impianti da fonte rinnovabile in vigore fino alla fine del 2008 (L.R. 22/2007 e L.R. 16/2007) prevedeva soglie per l'Autorizzazione Unica molto inferiori rispetto a quelle vigenti sul territorio nazionale; inoltre per impianti di piccola taglia non erano applicabili le procedure semplificate, quali la dichiarazione di inizio attività e la comunicazione di avvio attività da effettuare presso il Comune.

Le soglie per l'attivazione del procedimento di Autorizzazione Unica per impianti da fonte rinnovabile, vigenti in Liguria ai sensi della L.R. 22/2007 e della L. R. 16/2008 prima che venissero modificate dalla L.R. 45/2008, sono riportate in Tabella 2, (in termini di potenza di picco): le procedure comunali semplificate (Dichiarazione di Inizio Attività, Comunicazione di Avvio Attività) erano attivabili solo per impianti inferiori a tali potenze.

A fine dicembre 2008, infatti, la Regione Liguria ha emanato la Legge regionale 45 del 24.12.2008, in cui le soglie per l'attivazione del procedimento di Autorizzazione Unica (Tabella 3) sono state uniformate a quelle vigenti nel resto d'Italia ed inoltre si rendono applicabili le procedure semplificate presso i Comuni per gli impianti di piccola taglia.

Il passaggio dalla L.R. 22/2007 alla L.R. 45/2008 ha avuto per effetto la diminuzione del numero di istanze. Nell'anno 2009 sono state presentate domande di autorizzazione unica per 5 impianti (3 fotovoltaici, 1 eolici, 1 cogenerazione). Nel triennio 2006 - 2008, sono state presentate 23 richieste, ma solo 6 (4 fotovoltaici, 1 eolico, 1 biogas) rientrano nelle soglie definite dalla L.R. 45/2008. In figura 3 è riportato il confronto fra numero di istanze pervenute e numero di istanze che recepibili in regime di autorizzazione unica secondo le soglie definite dalla L.R. 45/2008 nei diversi anni dalla L.R. 45/2008.

Il grafico in Figura 4, infine, riepiloga le potenze per cui è stata rilasciata l'autorizzazione.

Tabella 2 – Soglie per l'Autorizzazione Unica di pannelli solari e fotovoltaici ed impianti eolici in Liguria ai sensi della L.R. 22/2007 prima che venisse modificata

Tipologia	Soglie per AU
Pannelli solari termici	Superficie > 100 m^2
	in zona di vincolo
Pannelli fotovoltaici	Potenza di picco > 10 kW
	in zone di vincolo
Impianti eolici	Potenza di picco > 5 kW
	in zone di vincolo

Tabella 3 - Soglia di potenza nominale per l'attivazione dell'Autorizzazione Unica in coerenza con la L. R. 45/2008

Fonte energetica	Soglia
Eolica	60 kW
Solare fotovoltaica	20 kW
Idraulica	100 kW
Biomasse	200 kW

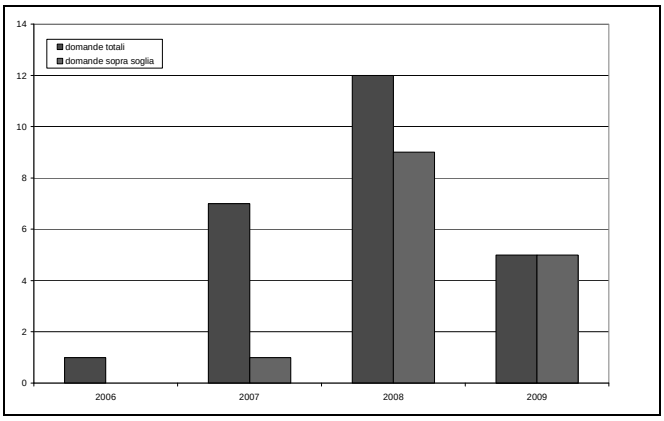


Figura 3 – Confronto fra numero di istanze pervenute e numero di istanze che necessitano di autorizzazione unica secondo la L.R. 45/2008 nei diversi anni

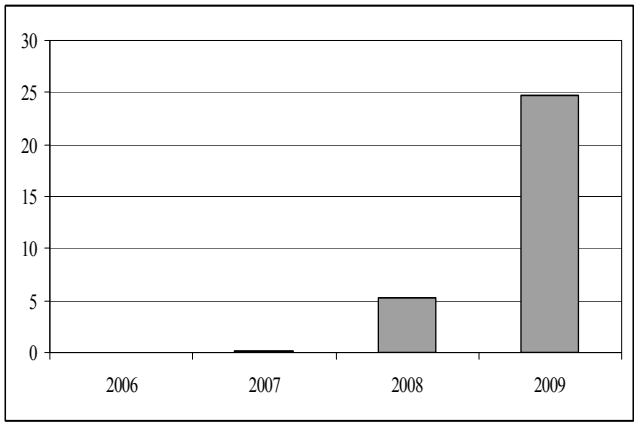


Figura 4 – Potenza in MW per cui è stata complessivamente rilasciata la AU per anno

3 CRITICITÀ PROCEDIMENTALI

3.1 Integrazione della normativa vigente

La prima difficoltà riscontrata è l'integrazione tra le diverse norme nazionali: in alcuni casi norme di diverso genere inquadrano la stessa tipologia di impianto; è questo il caso, ad esempio, degli impianti alimentati a biogas, che possono essere soggetti sia alla normativa riguardante gli impianti alimentati da fonte rinnovabile sia quella in materia di rifiuti. La difficoltà principale consiste nell'applicare e coordinare le diverse norme per individuare il corretto percorso autorizzativo.

Un'altra criticità è costituita dal coordinamento delle norme nazionali e regionali. Queste incongruenze erano particolarmente significative anteriormente al 2009, quando in Liguria si prevedeva l'attivazione del procedimento di Autorizzazione Unica per potenze (di picco) per le quali a livello nazionale era sufficiente la presentazione della Dichiarazione di Inizio Attività in Comune.

Un aspetto di non sempre facile interpretazione, inoltre, è la verifica della necessità o meno della Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) da parte della Regione Liguria.

Gli impianti di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile di tipologia e potenza indicati nella L.R. 38/1998 "Disciplina della valutazione di impatto ambientale" (e regolamenti attuativi), infatti, sono soggetti a screening (una sorta di VIA semplificata) o VIA, che si configura come un sub-procedimento rispetto a quello di Autorizzazione Unica. In tali casi, infatti, la Provincia avvia il procedimento di Autorizzazione Unica e quindi lo sospende in sede di conferenza dei servizi referente, in attesa della pronuncia di VIA da parte della Regione. Il Decreto di VIA può modificare anche sostanzialmente l'opera in progetto e quindi alla riapertura del procedimento di Autorizzazione Unica provinciale, l'impianto da autorizzare può essere diverso da quello del progetto inizialmente presentato; di conseguenza la documentazione integrativa richiesta dagli Enti alla prima conferenza dei servizi potrebbe non avere più validità e potrebbe rendersi necessaria una nuova convocazione della conferenza dei servizi in sede referente anziché deliberante.

Di notevole complessità amministrativa, infine, si è rivelata l'autorizzazione di impianti di cogenerazione. Si tratta di fatto di centrali alimentate da fonte convenzionale, la cui tecnologia di processo permette un efficace sfruttamento del calore prodotto da utilizzare per reti di teleriscaldamento o raffrescamento. La normativa nazionale (D. Lgs. 115/2008) li considera di fatto assimilati agli impianti da fonte rinnovabile, prevedendo una procedura di Autorizzazione Unica che comprende anche le opere connesse e le infrastrutture indispensabili per impianti inferiori ai 300 MW di potenza.

D'altra parte, la normativa regionale è ancora incompleta per quanto riguarda gli impianti di cogenerazione: la normativa attualmente in vigore, infatti, non assegna esplicitamente alla Provincia (né al Comune) la competenza specifica per l'Autorizzazione Unica per gli impianti di cogenerazione, mentre assegna alla Provincia la competenza autorizzativa per gli impianti di produzione di energia elettrica da fonte convenzionale, fra cui il metano, che di fatto costituisce la "metà elettrica" di un impianto cogenerativo (ma non è prevista una autorizzazione unica specifica per la "metà termica" ed il teleriscaldamento). Inoltre, nel caso delle fonti convenzionali la norma regionale non prevede l'autorizzazione delle opere connesse all'interno dell'Autorizzazione Unica per la produzione di energia elettrica (a differenza di quanto previsto, invece, per le fonti rinnovabili).

3.2 Coordinamento con gli altri Enti

Alcuni aspetti riguardanti l'impianto e le opere connesse devono essere valutati da più Enti: si presentano criticità, principalmente per impianti eolici, dovute alla molteplicità di competenze, in particolare in materia di urbanistica e paesaggio (sono coinvolte Provincia, Regione, Comune e Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici) e di sorvolo aereo (Aeronautica, Esercito, ENAC, ENAV).

Il coordinamento con il Comune si rende importante nel caso debba essere valutato se l'impianto è accessorio o meno all'intervento edilizio. Nel caso di impianti energetici con carattere secondario e strumentale rispetto all'intervento edilizio, infatti, l'iter approvativo dell'intervento edilizio è da considerare prevalente ed assorbente rispetto a quello di Autorizzazione Unica. La normativa regionale afferma che, in tale caso, è sufficiente applicare la procedura urbanistico-edilizia relativa all'opera principale, nel cui contesto va acquisito l'atto di autorizzazione della Provincia sull'impianto di produzione di energia (autorità tenuta ad esprimersi sotto il profilo ecologico-ambientale), possibilmente in sede di Conferenza di Servizi indetta dal Comune.

3.3 Procedure semplificate in capo al Comune

Al momento della presentazione della domanda da parte del Proponente si rende necessaria un'attenta valutazione della tipologia dell'impianto, che non si può limitare alla sola valutazione della potenza di picco prevista per l'impianto. In funzione del tipo di tecnologia impiegata, infatti, può essere possibile l'autorizzazione attraverso le procedure semplificate di Dichiarazione di Inizio Attività (DIA) o di Comunicazione di Avvio Attività (CAA).

E' questo il caso, in particolare, degli impianti fotovoltaici che presentano le caratteristiche di "aderenti o integrati nei tetti dell'edificio": sia il D. Lgs. 115/2008 sia la L.R. 45/2008 prevedono che per questo tipo di impianti sia sufficiente una comunicazione preventiva in Comune, anche se la potenza di picco lo farebbe ricadere nella casistica dell'Autorizzazione Unica provinciale.

La Regione Liguria prevede che le stesse procedure semplificate siano applicate anche nei casi di impianti fotovoltaici "non integrati o aderenti con la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda, purché di superficie non superiore a quella della copertura".

Nell'ambito della normativa nazionale, resta di difficile applicazione l'art. 5 comma 7 del D. M. 19.02.2007, in cui si stabilisce che gli impianti fotovoltaici che non necessitano di alcuna autorizzazione sono soggetti a DIA, mentre se è necessaria l'acquisizione di un solo provvedimento autorizzativo, l'acquisizione di tale provvedimento sostituisce il procedimento di autorizzazione unica. Nella maggior parte dei casi, tale articolo non risulta infatti applicabile.

3.4 Apposizione del vincolo preordinato all'esproprio

La normativa stabilisce che gli impianti che producono energia elettrica da fonte rinnovabile sono da considerarsi "di pubblica utilità, indifferibili ed urgenti". Ne consegue che il Proponente ha la possibilità di richiedere, al momento della presentazione della domanda di Autorizzazione Unica, anche l'apposizione del "vincolo preordinato all'esproprio", che si configura come un procedimento a sé stante rispetto all'Autorizzazione Unica. Il vincolo preordinato all'esproprio si rende necessario nei casi in cui il titolare dell'impianto non abbia ottenuto la disponibilità dei terreni, proprietà di altri soggetti, su cui deve essere installato l'impianto o le opere connesse (un caso frequente ha riguardato l'attraversamento di terreni da parte di linee elettriche asservite ad impianti eolici). In tale caso il provvedimento autorizzativo da' inizio alla procedura di esproprio.

La difficoltà nel predisporre il procedimento di apposizione del vincolo preordinato all'esproprio consiste essenzialmente nell'ottenere tutte le informazioni relative alle proprietà dei terreni. Purtroppo questo aspetto relativo alle proprietà viene spesso sottovalutato dai progettisti, con conseguente allungamento dei tempi per il rilascio dell'Autorizzazione Unica.

4 ALCUNE SOLUZIONI

Al fine di superare le problematiche dovute all'integrazione delle diverse normative nazionali e regionali, si è sviluppato un dialogo fra le Amministrazioni Provinciali liguri e la Regione Liguria sulle difficoltà riscontrate nell'applicazione delle norme, in particolare in merito al sovradimensionamento dell'iter procedurale, in base alla pregressa normativa ora modificata, rispetto alle dimensioni dell'impianto. Le difficoltà sono state in gran parte risolte con l'emanazione della L.R. 45/2008, che ha modificato le soglie in potenza di picco per l'assoggettamento degli impianti al procedimento di Autorizzazione Unica ed ha esteso l'applicazione di procedure autorizzative semplificate.

Attualmente le soglie in vigore in Liguria sono uguali a quelle vigenti sul resto del territorio nazionale e sono quelle indicate nella Tabella 3.

Il coordinamento con gli Enti che intervengono in conferenza dei servizi è migliorato con l'approfondimento delle problematiche che caratterizzano ciascun tipo di impianto.

Peraltro, onde garantire il rispetto dei tempi procedimentali, nei confronti degli Enti che non partecipano alle conferenze dei servizi o non esprimono pareri nei tempi dovuti, si ricorre alla stretta applicazione delle norme generali in materia di procedimento amministrativo (ovvero il silenzio/assenso che comunque interviene dopo un congruo periodo di tempo, stabilito in conferenza dei servizi, per una eventuale espressione).

Allo scopo di migliorare il coordinamento con i Comuni, i quali sono chiamati ad esprimersi in sede di conferenza dei servizi nel caso di Autorizzazione Unica o ad autorizzare impianti con le procedure semplificate di DIA o CAA, la Provincia di Genova, in collaborazione con Fondazione MUVITA, nel 2009 ha realizzato il corso "FREE-PA" di informazione e formazione per funzionari tecnici ed amministrativi degli Enti Pubblici in materia di fonti di energia rinnovabile, risparmio ed efficienza energetica. Nel corso, della durata di 30 ore, oltre a trattare il tema autorizzativo, ai corsisti sono state fornite anche conoscenze utili a promuovere, nell'ambito dei Comuni di appartenenza, iniziative di risparmio energetico, aumento dell'efficienza energetica e installazione di impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili.

Nei confronti dell'utenza spesso è stata realizzata una sorta di attività "preistruttoria", tramite incontri preliminari in ufficio con i tecnici progettisti al fine di individuare, caso per caso, il tipo di procedimento autorizzativo dell'impianto e, per i casi di competenza provinciale, per evidenziare eventuali aspetti da approfondire tecnicamente.

Per quanto riguarda l'autorizzazione di impianti di cogenerazione, onde superare l'incompletezza normativa a livello regionale, la Provincia ha dato avvio al procedimento di autorizzazione per un impianto in quanto considerato alimentato da fonte fossile e quindi autorizzato ai sensi della Legge Regionale 22/07 e successive modifiche e integrazioni.

Un valido supporto per la comunicazione con l'utenza, che intende installare impianti che producono energia da fonte rinnovabile, è svolto dallo Sportello provinciale per le energie rinnovabili, realizzato e gestito con il supporto di Fondazione MUVITA. All'interno del sito internet dello Sportello (www.sportelloenergierinnovabili.it) sono disponibili informazioni in merito alle autorizzazioni necessarie, ai possibili finanziamenti ed al risparmio energetico.

5 CRITICITÀ TECNICHE

5.1 Aspetti generali

La domanda di Autorizzazione Unica deve contenere una serie di informazioni di tipo amministrativo e di tipo tecnico.

Al primo gruppo appartengono le notizie relative alla proprietà dell'impianto e dei terreni o edifici sui cui verrà costruito, oltre alle informazioni relative al gestore dell'impianto.

Per quanto riguarda la parte tecnica, la domanda deve essere corredata da una relazione, in cui siano descritte tutte le caratteristiche impiantistiche e gli impatti ambientali che possono verificarsi nelle fasi di costruzione ed esercizio.

Si riporta di seguito un elenco, non esaustivo, delle principali criticità riscontrate nelle fasi di rilascio dell'autorizzazione per diverse tipologie di impianto:

1. aspetti strutturali di statica (azione del vento, del sisma, della struttura di supporto);
2. effetto di abbagliamento dei pannelli fotovoltaici (strade e voli aerei);
3. ingombro dei manufatti in relazione al sorvolo aereo (soprattutto per impianti eolici);
4. impatti ambientali specifici (acustica, naturalistici, di paesaggio, ecc.).

5.2 Aspetti strutturali

Nel caso di pannelli fotovoltaici posizionati su coperture di edifici, la relazione tecnica deve individuare se la struttura portante è in grado di sopportare l'ulteriore carico dei pannelli, anche nelle condizioni di eventuale aggravio per la presenza di neve e/o di personale addetto alla manutenzione. Inoltre, non sempre viene considerato l'effetto dell'azione del vento sui pannelli (per fotovoltaici non integrati) e quindi la relazione deve essere integrata da specifiche relative anche all'ancoraggio dei pannelli stessi.

Un altro aspetto spesso trascurato è quello dell'azione del sisma.

Nel caso di impianti eolici i progettisti sono tenuti a fornire una relazione geologica e di stabilità delle fondazioni, che comprenda il carico, l'effetto dinamico dei rotori e l'azione del vento e del sisma (anche combinati).

5.3 Abbagliamento

I pannelli fotovoltaici, pur essendo costruiti per catturare i raggi solari, possono presentare effetti riflettenti, che possono costituire un pericolo nel caso in cui la riflessione dei raggi solari vada a colpire strade ad elevato flusso di traffico o l'impianto si trovi all'interno dei corridoi di decollo e atterraggio degli aerei.

5.4 Sorvolo aereo

Un aspetto che non deve essere sottovalutato riguarda le possibili interferenze degli impianti con i voli aerei a bassa quota, soprattutto nel caso di impianti eolici (anche di taglia modesta).

Gli ostacoli verticali con un'altezza superiore ai 15 m devono essere segnalati al fine della rappresentazione sulle carte di navigazione aerea. I dettagli sono indicati sulle norme dello Stato Maggiore della Difesa e le informazioni devono essere trasmesse al C.I.G.A. (Centro Informazioni Geotopografiche Aeronautiche).

Più in generale, si può affermare che gli aerogeneratori possono costituire un potenziale pericolo per i voli a bassa quota e quindi è opportuno segnalarne la presenza ai principali Enti che, sul territorio, sono coinvolti nel tema "volo aereo": per questo motivo si è ravvisata l'opportunità, per una maggiore sicurezza generale, di inserire fra le prescrizioni dei provvedimenti autorizzativi la segnalazione, da parte del gestore dell'impianto, della presenza dell'ostacolo non solo all'Aeronautica Militare, all'ENAC ed all'ENAV ma anche, ad esempio, a: Corpo Forestale dello Stato, Vigili del Fuoco, Protezione Civile regionale, Croce Rossa militare e civile, Polizia di Stato, Carabinieri, Aeroporti e Aeroclub presenti sul territorio.

5.5. Impatti ambientali

La relazione tecnica allegata alla domanda di Autorizzazione Unica deve contenere la previsione degli impatti dell'opera sull'ambiente, sia in fase di esercizio che di costruzione.

Mentre per alcune tipologie di impianto quali i fotovoltaici sulle coperture di edifici, gli aspetti da valutare sono abbastanza limitati, nel caso degli impianti eolici gli impatti sul paesaggio e sul rumore possono costituire fattori rilevanti.

In materia paesaggistica le relazioni a volte non sono sufficientemente puntuali e non tengono in debita considerazione l'uso del territorio da parte della popolazione.

Per quanto riguarda le immissioni rumorose, i casi più rilevanti hanno riguardato impianti eolici, a biogas e di cogenerazione (nel caso, unico sinora, di impianto idroelettrico le criticità erano di fatto inesistenti per l'assenza di recettori in prossimità degli impianti potenzialmente rumorosi). Trattandosi di stime di impatto acustico per impianti non ancora esistenti, come aspetto tecnicamente critico si è spesso rivelato quello dell'attendibilità del calcolo previsionale, nonché del differenziale fra stato previsto ed attuale, in genere non corredato da valutazioni sull'incertezza dei valori presentati né sulla calibrazione dei modelli numerici utilizzati.

In relazione agli impianti eolici, inoltre, vanno sottolineati due temi abbastanza peculiari che sono stati oggetto di necessari approfondimenti in sede istruttoria: l'impatto acustico alle basse e bassissime frequenze (queste ultime, inferiori a 20 Hz, non normate) e la difficoltà applicativa dei valori limite previsti dalla normativa in materia acustica ad un caso in cui i valori di rumore vanno misurati in condizioni anemologiche che in genere non rientrano fra quelle ammesse per poter effettuare misurazioni ai sensi di legge (cioè vento eccessivamente intenso).

Dal punto di vista amministrativo, il tema rumore è gestito attraverso l'espressione favorevole del Comune in sede di Conferenza dei Servizi per quanto riguarda l'esercizio dell'impianto, mentre le autorizzazioni per le fasi di cantiere sono demandate all'iter procedimentale specifico, in capo al Comune, previsto per le lavorazioni temporanee e/o all'aperto, iter da attivare a cura del Proponente in sede di cantierizzazione dell'opera.

Per impianti eolici di una certa rilevanza, che sono soggetti a VIA, la Regione Liguria richiede che siano effettuati studi sull'avifauna e sulla chirotterofauna della durata di almeno un anno.

Infine, si vuole brevemente accennare ad un aspetto che esula dalla procedura di Autorizzazione Unica ma che, a ben guardare, da un punto di vista generale non è certo secondario e che riguarda la valutazione del reale risparmio di emissioni di gas serra, valutazione che per essere realistica non può limitarsi alla stima della mancata emissione di CO_2 equivalente per la produzione di energia elettrica erogata dall'impianto anziché prodotta da fonte fossile.

Lo scopo di una tale valutazione sarebbe quello di comprendere sia il beneficio reale sia l'impatto ambientale complessivo che un impianto alimentato da fonte rinnovabile produce, a partire dalla produzione dei componenti dell'impianto stesso, quindi il trasporto sul sito e la costruzione, l'esercizio ed infine la dismissione. Una sorta di life-cycle assessment al fine di valutare effettivamente la convenienza (come emissione di gas serra mancata) rispetto alla produzione di energia elettrica da fonte convenzionale.

6 SOLUZIONI ADOTTATE

La relazione tecnica che accompagna la domanda di autorizzazione unica deve contenere non solo il progetto definitivo dell'impianto e delle opere connesse, ma anche la valutazione degli impatti ambientali, che sono definiti per le diverse tipologie di impianto da alcune deliberazioni della Giunta Regionale.

Al fine di agevolare il compito dei progettisti, la Provincia di Genova ha predisposto delle linee guida, al momento ancora provvisorie ed in via di perfezionamento, contenenti gli argomenti che devono essere affrontati nella relazione tecnica.

Il documento è stato redatto con lo scopo di fornire ai progettisti uno schema di predisposizione della domanda e dei suoi allegati tecnici, individuando i temi meritevoli di particolare approfondimento.

All'interno del documento, perciò, sono state inserite schede e modelli da utilizzare affinché la relazione sia completa dei dati tecnici fondamentali necessari per l'autorizzazione.

Nella parte iniziale delle linee guida sono state inoltre descritte le norme che vengono applicate per ogni tipo di impianto, oltre alle informazioni relative al percorso autorizzativo, con particolare riferimento alla tempistica.

Per il chiarimento di aspetti tecnici e procedurali, un utile e positivo ruolo verso l'utenza è svolto anche dallo Sportello per le Energie Rinnovabili già ricordato.

Allo scopo di rendere più lineare il percorso autorizzativo, è in via di predisposizione il regolamento per il rilascio dell'Autorizzazione Unica. Tale documento sarà formalmente adottato dall'Amministrazione Provinciale e pertanto costituirà la guida per l'Autorizzazione Unica.

7 CONCLUSIONI

Nell'iter di autorizzazione di impianti che producono energia da fonte rinnovabile emergono criticità nella procedura amministrativa e problematiche di tipo tecnico, causate anche dalla relativa novità degli impianti.

L'evoluzione della normativa ha permesso di superare in gran parte i nodi critici di tipo amministrativo, causati per lo più da sovrapposizione di competenze e contraddizioni fra norme diverse emanate in tempi diversi.

Restano ancora irrisolte alcune questioni legate ai procedimenti amministrativi interni ad ogni Ente che devono raccordarsi con i tempi e i modi dell'Autorizzazione Unica. A questo è necessario sopperire attraverso i rapporti e gli accordi tra gli uffici interessati.

L'effettuazione di un corso per i tecnici degli Enti che sono chiamati ad esprimersi nelle conferenze dei servizi ha sicuramente aiutato a conoscere le problematiche che tali impianti comportano e fornito utili strumenti tecnici per autorizzare un impianto.

Dal punto di vista tecnico, soprattutto nel primo periodo, oltre alla incompletezza della normativa si è scontata anche una certa inesperienza, su tutti i versanti, tutto sommato preventivabile vista anche la relativa novità dell'argomento, almeno dal punto di vista meramente applicativo.

La redazione di un piccolo manuale pratico contenente le linee guida da seguire per la predisposizione della relazione tecnica può rivelarsi, anche nell'attuale fase più matura, un aiuto importante, anche per anticipare eventuali richieste integrative che potrebbero emergere in sede di conferenza dei servizi: l'obiettivo è infatti riuscire ad autorizzare l'impianto in tempi brevi aumentando efficienza ed efficacia dell'azione amministrativa.

STUDIO DI IMPATTO E ANALISI DELLE CRITICITÀ LEGATI ALLE LINEE AD ALTA TENSIONE NELLA PROVINCIA DI ALESSANDRIA

Parisato Emiliano[2], Erbetta Laura[2], Biorci Elena[1], Coffano Claudio[1]

[1]Provincia di Alessandria – Direzione Ambiente e Territorio, Via Galimberti 2/A, 15100 Alessandria, elena.biorci@provincia.alessandria.it, [2]ARPA Piemonte – Dipartimento di Alessandria, Spalto Marengo 37, 15100 Alessandria, l.erbetta@arpa.piemonte.it, e.parisato@arpa.piemonte.it

SOMMARIO

Il presente studio è stato concepito allo scopo di valutare in base alla nuova normativa le emissioni elettromagnetiche generate da linee di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica nella provincia di Alessandria (657Km di linee da 132kV a 380kV) e di definire una carta provinciale che illustri le criticità verso l'esposizione ai campi elettrici e magnetici a 50 Hz. Lo studio ha previsto la definizione di 3 fasce di rispetto per il campo magnetico a 50Hz per ciascuna linea (fascia1: B ≥3μT – fascia2: 1.5 μT≤B<3 μT – fascia3: 0.5 μT≤B<1.5μT) mediante calcolo teorico basato su formule analitiche approssimate (Norma CEI 106-11) e su dati geometrici, strutturali e di carico elettrico. La classificazione delle linee in base alle fasce di rispetto e l'analisi dell'edificato ricompreso entro le 3 fasce ha permesso di definire un indice di criticità in base al quale è stato definito un monitoraggio di 160 aree distribuite su 34 Comuni con 500 misure di campo elettrico e magnetico in ambiente abitativo ed esterno differenziate in relazione all'impatto delle linee e al grado di vulnerabilità e antropizzazione del territorio. Lo studio ha portato ad individuare 40Km di linee maggiormente critiche con un'area di impatto di 4Km^2 che interessa lo 0.7% circa della popolazione provinciale con livelli di campo magnetico che, nel 13% delle misure, risulta essere superiore a 3μT.

1 CARTA DI IDONEITÀ ELETTROMAGNETICA PER LE LINEE LETTRICHE AD ALTA TENSIONE

Il recente D.M.A. 29/05/08 ha riportato l'attenzione sull'impatto ambientale delle linee elettriche ad alta tensione e sulla loro compatibilità con un ambiente fortemente antropizzato quale quello italiano. L'esplicitazione dei criteri per la definizione delle fasce di rispetto degli elettrodotti permette ora di verificare le reali problematiche connesse con la presenza di linee ad alta tensione sul territorio consentendo anche l'acquisizione dai gestori di rete di tutti i dati tecnici necessari per una corretta valutazione delle emissioni.[1]

Per uno studio degli impatti e la conseguente analisi delle criticità legati alla presenza di linee elettriche A.T. sul territorio alessandrino ci si è avvalsi come strumento base della Carta di Idoneità Elettromagnetica, già precedentemente utilizzata per un analogo studio sulle sorgenti a radiofrequenza, ovvero una carta tematica che rappresenta il grado di sensibilità del territorio all'inquinamento elettromagnetico e che scaturisce dall'analisi degli strumenti urbanistici vigenti aggregando tutte le informazioni di carattere urbanistico e ambientale disponibili (Piano Regolatore Generale Comunale, tipo di fruizione del territorio, ricettori sensibili, Piano di Classificazione Acustica, etc.).[2] Tale carta costituisce il punto di partenza per valutare il grado di compatibilità di una determinata area con un dato livello di inquinamento elettromagnetico suddividendo il territorio in aree omogenee dal punto di vista della vulnerabilità al fattore di pressione di volta in volta considerato. Il fattore considerato nel presente studio sono le linee elettriche aeree presenti sul territorio alessandrino con tensione pari a 380, 220 e 132 kV.

1.1 Controllo dei tracciati delle linee ad alta tensione presenti sul territorio e caricamento su supporto G.I.S. (Geographic Information System)

Preliminarmente è stato necessario predisporre una cartografia precisa su supporto G.I.S. dei tracciati delle linee di interesse su tutto il territorio provinciale. Ciò è stato realizzato sia mediante i dati desunti dal catasto regionale degli elettrodotti, sia mediante controlli mirati sul campo nei luoghi di maggior interesse (stazioni di trasformazione, cabine primarie, cabine utente ed in generale nelle zone di convergenza di più linee), sia mediante l'utilizzo di immagini aeree ad alta risoluzione. In questo modo si è ultimata la mappatura delle linee ad alta tensione che insistono sul territorio provinciale, aggiornando l'archivio dati a nostra disposizione.

Per la compilazione delle informazioni tecniche basilari per lo studio è stato fondamentale il contributo dei gestori della rete che, in conseguenza dell'emanazione del D.M.A. 29/05/08, hanno fornito per tutte le linee di loro competenza i dati aggiornati (numerazione e coordinate UTM) per quanto riguarda i sostegni (tralicci), e tutti i dati tecnici necessari alle valutazioni: geometria, tipo di sostegno, portata in corrente in servizio normale, altezza del conduttore in corrispondenza del sostegno. Di ciascuna linea sono stati inoltre inseriti a catasto il numero e la denominazione (ad esempio linea a 380 kV n°351 Vignole Borbera-Castelnuovo Scrivia) e la tipologia a seconda che la linea sia a semplice o doppia terna trifase, con conduttore per ogni fase singolo, binato o trinato (Tabella 1).

In figura 1 si riportano i tracciati delle linee a 380, 220 e 132 kV censiti sul territorio provinciale con l'ubicazione delle principali stazioni di trasformazione.

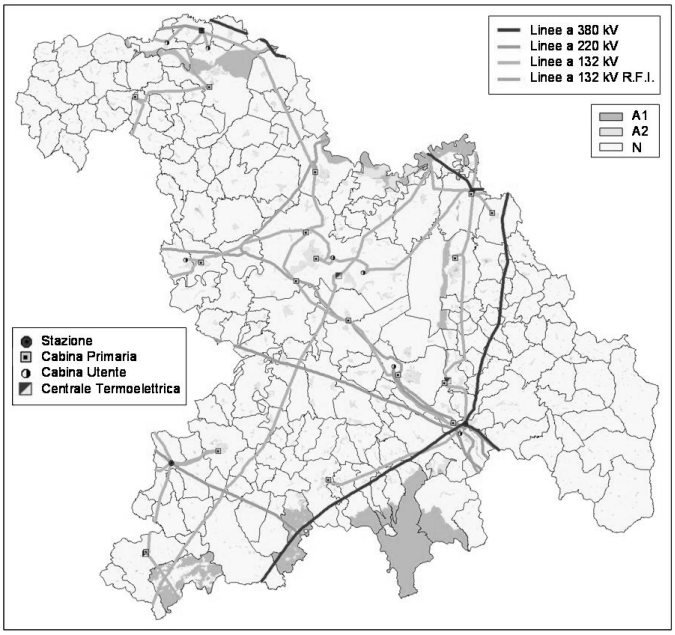


Figura 1: Provincia di Alessandria: Linee elettriche ad alta tensione e Carta di Idoneità Elettromagnetica

Dall'analisi dell'archivio informatizzato completato con le suddette informazioni è emerso che sulla Provincia di Alessandria insistono complessivamente 657Km di elettrodotti a 380, 220 e 132 kV di cui il 70% è costituito da linee a 132kV, mentre il restante 30% si divide tra le restanti linee a tensione maggiore.

Tabella 1: Classificazione delle linee a 380 e 220 kV sulla base dei dati tecnici inseriti nel catasto informatizzato.

Tensione	N° terna	Denominazione	Tipo linea	Configurazione	Dist. cavi (m)	Corrente (A)
380 kV	349	Castelnuovo - Trino	semplice terna trinata	delta	7.4	2310
	351	Castelnuovo - Vignole B.	semplice terna trinata	delta	7.4	2310
	383	Castelnuovo - Baggio	semplice terna trinata	delta	7.4	2310
	393	Vado Ligure - Vignole B.	semplice terna trinata	delta	7.4	1591
	394	Spezia Stazione - Vignole B.	semplice terna singola	delta	7.4	1376
220 kV	245	Casanova - Vignole B.	semplice terna singola	delta	8.2	558
	246	ILVA Novi L. - Novi Ligure	semplice terna singola	triangolo	8.2	558
	262	Morigallo - Vignole B.	semplice terna trinata	delta/gatto	8.2	1467
	263	Bistagno - Casanova	semplice terna binata	triangolo	8.2	882
	264	Bistagno - Erzelli	semplice terna binata	triangolo	8.2	794
	265	ILVA Novi L. - Vignole B.	semplice terna singola	delta	8.2	558
	270	Balzola - Trino Nucl.	semplice terna singola	triangolo	8.2	658
	277	Erzelli - Vignole B.	semplice terna singola	delta	8.2	710
	283	S.Colombano - Vignole B.	semplice terna singola	delta	8.2	558

2 CLASSIFICAZIONE DELLA CRITICITÀ DELLE LINEE SULLA BASE DEGLI INDICATORI AMBIENTALI PRESSIONE – STATO – RISPOSTA

Sulla scorta dei dati raccolti è stato possibile analizzare l'inquinamento elettromagnetico da linee A.T. sulla base degli indicatori ambientali pressione – stato – risposta [3] [4] così definiti per la tematica in questione:

Indicatore di pressione: estensione della linea elettrica per unità di area coperta dalla linea stessa (Km/Km^2)

Indicatore di stato: stima della induzione magnetica a 50Hz calcolata come proiezione a terra dei livelli emessi dalla linea secondo le formule analitiche approssimate indicate nella Norma CEI (CEI 106-11, 2006) ad individuare 3 fasce di impatto (fascia 1: B ≥3μT – fascia 2: 1.5 μT≤B<3 μT – fascia 3: 0.5 μT≤B<1.5μT) e valutazione della criticità della linea sulla base dell'edificato intercettato dai corridoi di impatto.

Indicatore di risposta: numero di interventi di misura effettuati sulla base delle criticità emerse dai fattori di pressione e di stato

Per quanto riguarda i fattori di pressione è stato dunque calcolato lo sviluppo in Km degli elettrodotti in rapporto all'area di ciascun comune come illustrato in Figura2-3.

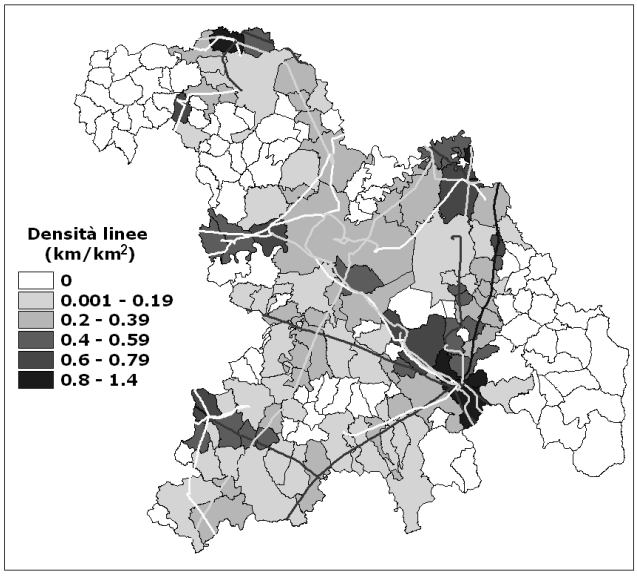


Figura 2: Provincia di Alessandria: cartografia dei comuni a maggior densità di linee (Km/Km^2)

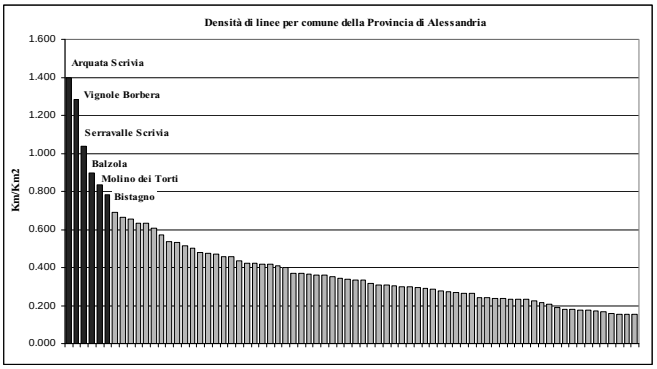


Figura 3: Provincia di Alessandria: densità di linee come indicatore di pressione calcolata per ciascun comune (Km/Km^2)

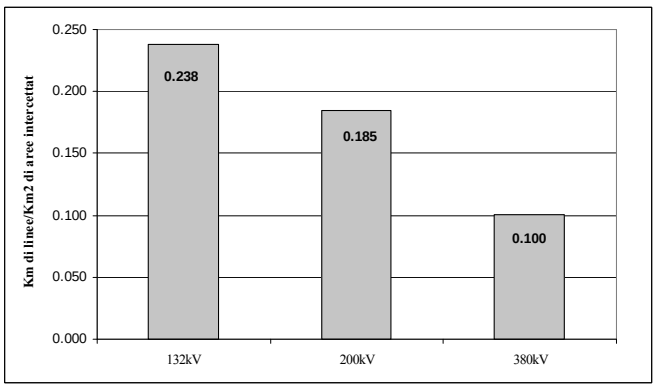


Figura 4: Km di linee elettriche a 132, 220 e 380 kV per unità di area sul territorio provinciale di Alessandria.

In Figura4 si mostra la sintesi sul territorio provinciale di tale indicatore da cui emerge la preponderanza delle linee a 132kV rispetto alle linee di trasmissione ad altissima tensione.

Per valutare la reale criticità di ciascuna linea occorre infine considerare la quantità di edificato intercettato dalle fasce di impatto dell'induzione magnetica.

2.1 Definizione delle fasce di impatto e della DPA degli elettrodotti come indicatore di stato

Come indicatore di stato è stato definito l'impatto di ciascun elettrodotto mediante il calcolo delle sue emissioni di induzione magnetica a 50Hz e la definizione di corridoi o fasce di impatto a terra ottenute mediante calcolo teorico sulla base dei dati geometrici, strutturali e di carico elettrico di ciascuna linea. Per ogni elettrodotto sono state delineate 3 fasce di impatto:

Fascia 1: spazio circostante l'elettrodotto che comprende tutti i punti caratterizzati da una induzione magnetica di intensità maggiore o uguale all'obiettivo di qualità di 3 μT previsto dalla normativa vigente [5].

Fascia 2: spazio circostante l'elettrodotto che comprende tutti i punti caratterizzati da una induzione magnetica di intensità compresa tra l'obbiettivo di qualità di 3 μT e la metà del suo valore (1.5 μT).

Fascia 3: spazio circostante l'elettrodotto che comprende tutti i punti caratterizzati da una induzione magnetica di intensità compresa tra 1.5 μT e 0.5 μT, valore quest'ultimo ritenuto cautelativo secondo il principio di "prudent avoidance" adottato dall'OMS.[6]

Per la determinazione dell'ampiezza delle fasce di rispetto si sono utilizzate le formule analitiche approssimate indicate nella Norma CEI 106-11 [7]; tali formule permettono il calcolo dell'induzione magnetica ad una data distanza dal centro geometrico dei conduttori della linea elettrica o, in maniera inversa, permettono di stimare la distanza da tale centro geometrico a cui si verifica un prefissato valore di induzione magnetica. In tale calcolo approssimato si assume che i conduttori siano tra loro paralleli e di lunghezza infinita in modo tale che l'induzione magnetica sia data dalla scomposizione in serie della legge di Biot e Savart, che, per la valutazione delle fasce di rispetto di nostro interesse, può essere troncata al primo termine [7]. Con questa approssimazione, le curve di isolivello dell'induzione magnetica sono dei cerchi aventi per centro il centro geometrico dei conduttori e l'ampiezza delle fasce 1-2-3 di impatto viene a coincidere con il raggio R delle circonferenze calcolate secondo le formule di seguito riportate assumendo come valore di B rispettivamente 3.0 - 1.5 - 0.5 μT. In questo modo la Fascia1 calcolata secondo le metodiche adottate viene a coincidere con la DPA (Distanza di Prima Approssimazione) definita dal D.M.A. 29/05/08. Fissato dunque un dato valore di B, il raggio R della circonferenza che mi dà la curva di isolivello dell'induzione magnetica dipende unicamente dalla tipo di geometria dei conduttori rappresentato dal parametro S, che stima le mutue distanze tra i conduttori, e dal parametro I che è la portata in corrente in servizio normale.

Rispetto al calcolo esatto, in quello approssimato si trascurano le fasi dei conduttori, le altezze dei sostegni e altri parametri tecnici che non sono significativi in un approccio di tipo cautelativo. L'errore commesso è minimo in quanto i due parametri che determinano differenze significative di emissioni magnetiche tra i vari tipi di elettrodotti sono le mutue distanze tra i conduttori, che più sono piccole e più danno luogo ad una compensazione delle fasi con conseguente riduzione dell'induzione magnetica, e la corrente che è direttamente proporzionale all'induzione magnetica stessa. Semplifica le cose il fatto che le configurazioni geometriche dei conduttori si riferiscono a poche tipologie standard, per cui i valori numerici di S si riducono, nel nostro caso, a tre diverse tipologie utilizzate nei seguenti calcoli.

Per le linee aeree trifase a semplice terna con configurazione a delta con conduttori disposti in piano, R è dato da:

$$R = 0.59 \cdot \frac{\sqrt{S_1 \cdot I}}{\sqrt{B}} \qquad (1)$$

Per le linee aeree trifase a semplice terna configurazione a triangolo con conduttori disposti ai vertici di un triangolo equilatero, R è dato da:

$$R = 0.49 \cdot \frac{\sqrt{S_2 \cdot I}}{\sqrt{B}} \qquad (2)$$

Per le linee aeree trifase a doppia terna con configurazione simmetrica, fasi omologhe affacciate e correnti uguali concordi, R è dato da:

$$R = 0.59 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot S_3 \cdot I}}{\sqrt{B}} \qquad (3)$$

Dove:

R = distanza (m) dal centro geometrico dei conduttori per un dato valore di B

I = portata in corrente in servizio normale come previsto dalla Norma Italiana CEI 11-60 (A) [8]

B = induzione magnetica (μT)

S_1 = media delle distanze in metri dei conduttori esterni (a,c) da quello centrale (b) in fig.5 – foto(1)

S_2 = media delle distanze tra i tre conduttori in fig.5 – foto(2)

S_3 = media delle distanze dei conduttori superiori ed inferiori (a,c) da quello centrale (b) in fig.5 – foto(3).

L'ampiezza delle fasce 1-2-3 di ciascun elettrodotto viene dunque a coincidere con il raggio R calcolato per valori di B rispettivamente di 3.0 - 1.5 - 0.5 μT dove la fascia 1 coincide con la DPA.

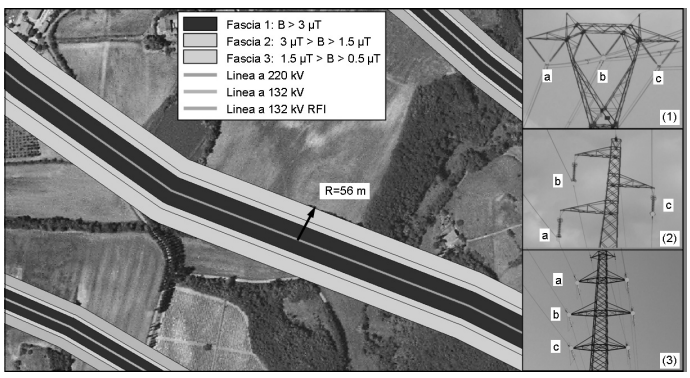


Figura 5: Fasce di rispetto e configurazioni geometriche tipo dei conduttori.

In tabella 2 si riportano alcuni esempi di calcolo per le linee al altissima tensione.

Tabella 2: Calcolo della DPA per le linee a 380 e 220 kV .

Tensione	N° terna	Denominazione	Dist. cavi (m)	Corrente (A)	DPA (m)
380 kV	349	Castelnuovo - Trino	7.4	2310	44
	351	Castelnuovo - Vignole B.	7.4	2310	44
	383	Castelnuovo - Baggio	7.4	2310	44
	393	Vado Ligure - Vignole B.	7.4	1591	37
	394	Spezia Stazione - Vignole B.	7.4	1376	34
220 kV	245	Casanova - Vignole B.	8.2	558	23
	246	ILVA Novi L. - Novi Ligure	8.2	558	19
	262	Morigallo - Vignole B.	8.2	1467	37
	263	Bistagno - Casanova	8.2	882	24
	264	Bistagno - Erzelli	8.2	794	23
	265	ILVA Novi L. - Vignole B.	8.2	558	23
	270	Balzola - Trino Nucl.	8.2	658	21
	277	Erzelli - Vignole B.	8.2	710	26
	283	S.Colombano - Vignole B.	8.2	558	23

2.2 Elaborazione degli indicatori di risposta. Stima delle criticità e criteri di controllo

Una volta calcolata la DPA e le altre fasce di impatto si è proceduto a verificare la percentuale di edificato intercettato dalle varie fasce in modo tale da stimare la criticità della linea in relazione alla popolazione potenzialmente esposta assegnando un indice di criticità ad ogni elettrodotto.

Per prima cosa è stata attribuita alle linee AT un classe di impatto, indicata con C_I sulla base dell'ampiezza della DPA e quindi dipendente dalla corrente di esercizio e dalla configurazione della linea. Alla C_I sono stati attribuiti tre valori ad indicare il crescente grado di impatto della linea secondo il criterio riportato in Tabella3

Tabella 3: Classificazione di impatto delle linee

Ampiezza della DPA della linea	Classe C_I di impatto
< 20 m	1
tra 20 e 30 m	2
>= 30m	3

Per la stima della popolazione esposta è stato quindi definito un indice di esposizione denominato I_E definito come:

$$I_E = \frac{A_E}{A_F} \times 100 \quad (4)$$

Dove:

A_E corrisponde alla superficie edificata complessiva che ricade entro il corridoio di impatto occupato dalla fascia 3 per ciascuna linea

A_F corrisponde alla superficie coperta dal corridoio di impatto occupato dalla fascia 3 per ciascuna linea come mostrato in Figura6.

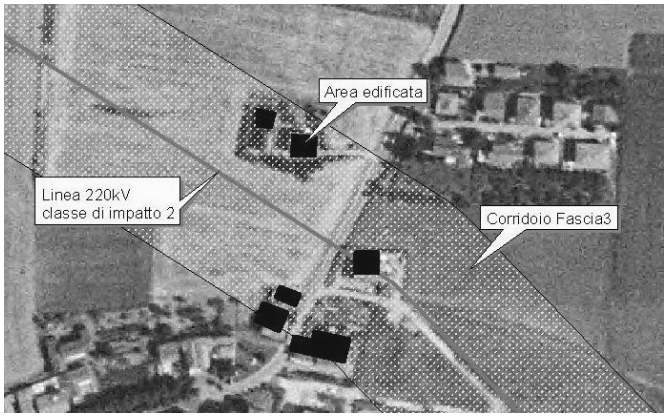


Figura 6: Esempio di classificazione di una linea a 220KV con indicazione di $C_{I,}$ A_E e A_F

Il prodotto dei due indici fornisce l'indice di criticità complessivo I_C della linea che riassume sia l'impatto legato alle sue emissioni potenziali sia quello legato alla presenza di popolazione esposta.

$$I_C = C_I \times I_E \quad (5)$$

Assegnando un I_C univoco a ciascuna linea si ottiene infine la classificazione delle linee in base alla loro criticità.

Uno dei risultati interessanti dello studio è che non tutte le linee a medio-alta criticità corrispondono a quelle a maggior tensione; anzi vi sono linee a 380kV classificate come bassa criticità e, al contrario, linee a 132kV classificate come media criticità. Le linee che hanno avuto la classificazione di massima criticità sono due: una a 220kV e una a 380kV. Presso queste linee si sono concentrati gli interventi di misura come illustrato più avanti.

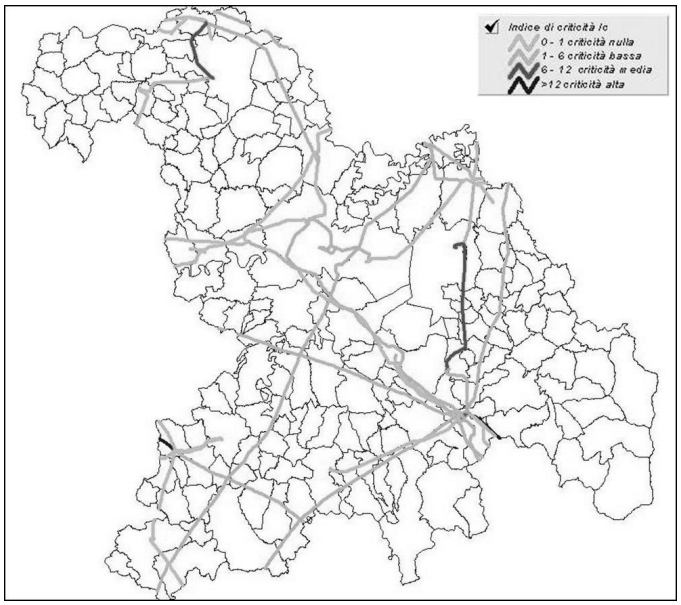


Figura 7: Provincia di Alessandria - cartografia delle linee A.T. classificate per grado di criticità

Una volta classificate le linee si è proceduto alla definizione dei criteri di intervento per stabilire il numero e la localizzazione delle misure di campo elettrico e induzione magnetica. Le misure sono state differenziate sia come numero che come tipologia a seconda del grado di criticità

stimata dell'area da controllare sulla base di criteri di intervento definiti in Tabella4. Il grado di vulnerabilità del territorio è indicato dalle aree A1, A2 e N così definite [2]:

Aree di attenzione di primo livello (A1): caratterizzate dalla presenza di ricettori sensibili (scuole, ospedali, luoghi per l'infanzia) o aree di pregio ambientale. In tali aree sono state previste misure presso tutti i ricettori sensibili (scuole, ospedali, luoghi per l'infanzia) o le aree di pregio ambientale situate all'interno delle fasce di rispetto. Nel caso delle Fasce 1 e 2 sono previste misure di induzione magnetica su un periodo di almeno 24 ore, permettendo quindi di valutare la variabilità temporale del livello di campo nel punto di misura.

Aree di attenzione di secondo livello (A2): aree ad uso esclusivamente o prevalentemente residenziale, ad elevata densità abitativa o altamente frequentate. In tali aree sono state previste misure di induzione magnetica presso tutti i ricettori situati all'interno della Fascia 1; nel caso delle Fasce 2 e 3 sono state previste ulteriori misure volte a caratterizzare l'area in esame.

Aree neutre (N): la restante parte del territorio. In tali aree sono state previste misure di induzione magnetica solamente all'interno della Fascia 1.

Tabella 4: Definizione dei criteri di intervento

	Fascia 1	Fascia 2	Fascia 3
A1	1 misura per recettore (24 h)	1 misura per recettore (24 h)	1 misura per recettore (no 24 h)
	In caso di area parco, solo se in presenza di edifici o aree fruibili, caratterizzazione dell'area		
A2	1 misura per recettore	Caratterizzazione dell'area	1 misura per area
N	Caratterizzazione dell'area solo se in presenza di edifici	/	/
Misure di campo elettrico e magnetico a 50Hz sotto le linee			

Sono stati previste inoltre, per ciascuna linea, alcune misure di induzione magnetica a 50Hz a varie distanza dalla linea in corrispondenza della fasce stimate in modo tale da valutare il reale decadimento del campo; infine sono state previste misure di campo elettrico per la verifica del rispetto dei limiti di legge al di sotto delle linee nei punti maggiormente critici.

Lo studio preliminare sin qui illustrato ha dunque permesso di pianificare un monitoraggio di 160 aree distribuite su 34 Comuni con 500 misure di campo elettrico e induzione magnetica in ambiente abitativo ed esterno differenziate in relazione all'impatto delle linee e al grado di vulnerabilità e antropizzazione del territorio.

3 ESITI DELLE MISURE

3.1 Misure di induzione magnetica a 50Hz

Le misure di induzione magnetica a 50Hz hanno riguardato 34 Comuni della provincia che presentavano le maggiori criticità secondo i criteri sopra esposti.

Sono state pianificate circa 490 misure di induzione magnetica a 50Hz effettuate mediante utilizzo di una sonda isotropa dotata di filtri selettivi in frequenza e in grado di fornire le componenti del campo elettrico o magnetico nelle tre coordinate spaziali. Le metodiche di misura sono ispirate a quanto prescritto dalla Norma CEI 211-6 [9]. Di seguito, in Figura7, si riporta un esempio di misura effettuata in presenza di edificato ricadente nelle fasce di impatto.

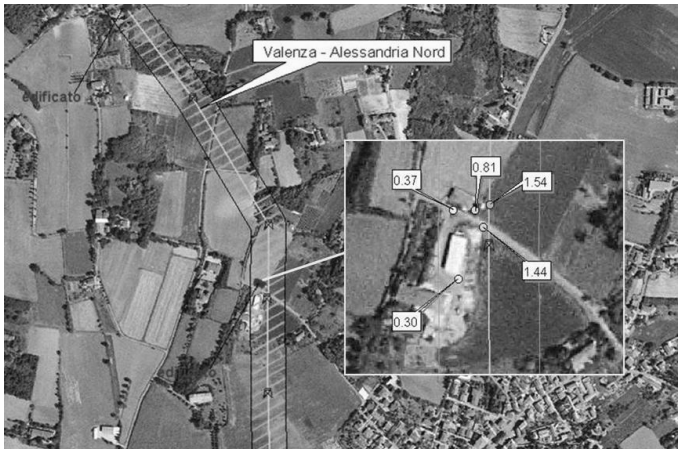


Figura 8: misura di induzione magnetica a 50Hz presso un'abitazione ricadente entro il corridoio di impatto di una linea a 132kV.

Le misure, effettuate rilevando il valore di induzione magnetica alla frequenza di 50Hz in modalità max hold a 1.5m dal suolo, sono state successivamente correlate ai valori di corrente effettivamente transitanti sulla linea all'ora e nel giorno della misurazione. La distribuzione dei livelli di induzione magnetica B misurati, espressi in microTesla, è riportata in Figura9. La maggior parte delle misure ricade al di sotto dell'obiettivo di qualità di 3 μT e solo il 13% presenta valori maggiori.

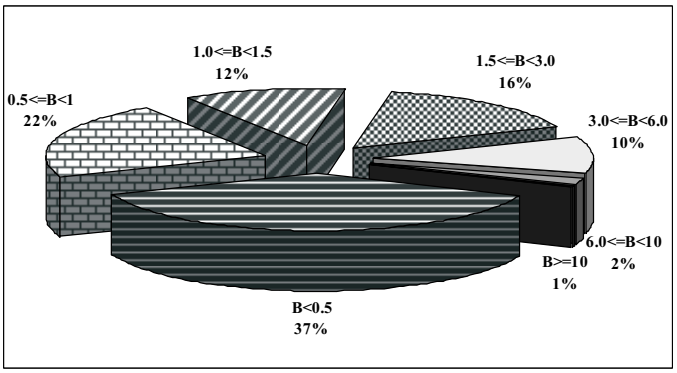


Figura 9: Distribuzione dei livelli di induzione magnetica B misurati (unità di misura: microTesla)

3.2 Misure di induzione magnetica sulle 24ore

In tutti i casi in cui la misura di induzione magnetica in prossimità di abitazioni abbia indicato valori superiori all'obiettivo di qualità di 3 μT si è proceduto ad effettuare una misura di induzione magnetica sulle 24ore all'interno delle abitazioni più esposte per la verifica della mediana dei valori secondo quanto previsto dalla normativa vigente [5]. Sono state scelte 8 abitazioni interessate dalla vicinanza con linee 220kV e 380kV ad elevato impatto.

In nessun caso sono stati superati i limiti di legge, anche se in alcuni casi la vicinanza al valore limite e l'estrema variabilità del dato non garantiscono del tutto il rispetto dei parametri di legge. Anche in questo caso le misure vanno correlate ai valori di corrente effettivamente transitanti sulla linea nell'arco delle 24ore della misurazione.

In Figura 10 su riporta il tracciato di una misura di induzione magnetica sulle 24ore: la strumentazione impiegata ha rilevato il valore efficace di induzione magnetica all'interno dell'abitazione ogni 60s. Il grafico evidenzia l'estrema variabilità dei valori in funzione della corrente transitante sulla linea.

Tabella 5: Esiti delle misure di induzione magnetica sulle 24 ore all'interno di abitazioni esposte

	Induzione magnetica (microTesla)				
Comune	Terna	min	media	max	mediana sulle 24h
Bistagno	N°263 a 220kV	1.80	2.53	3.14	2.63
Bistagno	N°263 a 220kV	4.67	7.31	10.30	7.48
Vignole B.ra	N°394 a 380kV	2.00	2.67	3.71	2.79
Vignole B.ra	N°394 a 380kV	0.00	0.23	0.69	0.15
Vignole B.ra	N°394 a 380kV	0.00	0.38	1.05	0.28
Vignole B.ra	N°394 a 380kV	0.12	0.32	0.51	0.33
Vignole B.ra	N°394 a 380kV	1.39	3.58	5.74	4.08
Arquata	N°394 a 380kV	0.00	1.34	3.08	1.40

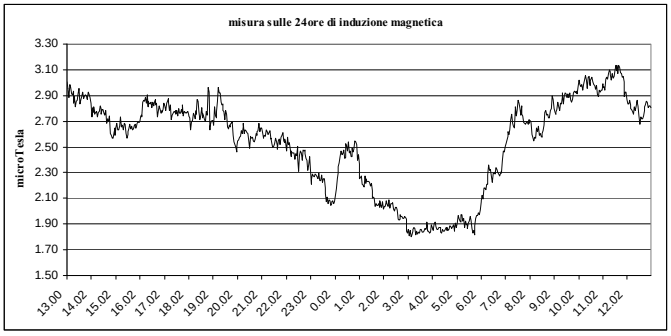


Figura 10: Andamento tipico dei valori di induzione magnetica sulle 24ore

3.3 Misure di campo elettrico a 50Hz

Presso le linee a maggior tensione sono stati fatti alcuni controlli di campo elettrico a 50Hz. Tale parametro, pur essendo meno significativo dal punto di vista protezionistico, è tuttavia soggetto ad un limite di esposizione pari a 5kV/m [5].

Tabella 6: Esiti delle misure di campo elettrico a 50Hz

	Campo elettrico (kV/m)	
Comune	Terna	max valore efficace sotto la linea
Pontecurone	N°351 a 380kV	6.90
Volpeglino	N°351 a 380kV	2.70
Vignole B.ra	N°394 a 380kV	2.20
Arquata Scrivia	N°394 a 380kV	9.50

In Tabella5 si evidenziano due superamenti del valore limite di capo elettrico che comporterà l'adozione di azioni di risanamento da parte del gestore della linea.

4 CONCLUSIONI

Il presente lavoro costituisce un approccio sistematico alla valutazione dell'impatto di linee elettriche ad alta ed altissima tensione sul territorio. Lo studio ha portato ad una classificazione delle linee AT in base allo loro criticità e ad individuare 5 Comuni e 40Km di linee maggiormente critici con un'area di impatto di 4Km^2 che interessa lo 0.7% circa della popolazione provinciale. Le 500 misure di induzione magnetica effettuate hanno evidenziato nel 13% dei casi un superamento dell'obiettivo di qualità di 3μT. Le misure di campo elettrico hanno inoltre evidenziato alcuni superamenti del limite di esposizione pari a 5kV/m.

5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. D.M.A. 28/05/2008 "Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti", suppl. ord. G.U. n.156 del 05/07/2008
2. Parisato Emiliano, Erbetta Laura, Biorci Elena, Coffano Claudio, C.I.E. - Carta di Idoneità Elettromagnetica - monitoraggio dei campi elettromagnetici a radiofrequenza nella Provincia di Alessandria, ARPA Piemonte edizioni, 2008
3. APAT rapporto RTI CTN_AGF 2/2005, Popolamento dell'indicatore di esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici (ELF/RF): strumenti, procedure, esempi, 2005
4. S.Adda, S. Facta, "Rapporto annuale sull'elettromagnetismo" ARPA Piemonte edizioni, 2008
5. D.P.C.M. 08/07/2003 "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz", G.U. n. 199 del 28/08/2003
6. OMS, Exposure to extremely low frequency fields -Fact Sheet N°322 (June 2007), pag.2
7. Norma CEI 106-11 "Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003", febbraio 2006, Editore CEI
8. Norma CEI 11-60 "Portata al limite termico delle linee elettriche aeree esterne con tensione maggiore di 100 kV", giugno 2002, Editore CEI
9. Norma CEI 211-6 2001-01 "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz – 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana", gennaio 2001, Editore CEI

NOMENCLATURA

Campo elettrico E (V/m): grandezza vettoriale che, in ogni punto di una data regione di spazio, rappresenta il rapporto fra la forza esercitata su una carica elettrica ed il valore della carica medesima.

Induzione magnetica B (T): grandezza vettoriale che, in ogni punto di una data regione di spazio, determina una forza su di una carica in moto. Come unità di misura sono di uso frequente i sottomultipli millitesla (1 mT = 10^{-3} T); microtesla (1 μT = 10^{-6} T). Viene infine ancora utilizzato, specialmente in Nord America, il gauss (G) (1 G = 10^{-4} T)

Campo magnetico H (A/m)**:** quantità vettoriale pari al rapporto tra l'induzione magnetica B e la permeabilità magnetica μ (H/m), che caratterizza le proprietà magnetiche del mezzo. Nel caso di campi elettromagnetici in aria, vale la corrispondenza 1 A/m = 1.26Bμ T.

PANNELLI FOTOVOLTAICI DI TERZA GENERAZIONE BASATI SU MATERIALI PLASMONICI

Pietro Di Rosa, Giorgio Guattari, Lucio Vegni, Filiberto Bilotti e Alessandro Toscano

Università "Roma Tre", Dipartimento di Elettronica Applicata,
via della Vasca Navale, 84, 00146–Roma, Italia

ABSTRACT

In this contribution, we propose the analysis of new capabilities of multilayer structures made of plasmonic and non-plasmonic materials, operating at optical frequencies. To this end, we develop general formulation, valid for any set of plasmonic and non-plasmonic media. Numerical results together with some remarks about possible practical implementations of the proposed components will be also given. Particularly, it is demonstrated that, once a medium with given constitutive properties is obtained, then some typical problems of the current photovoltaic systems, such as leakage in transmitted power and losses due to attenuation, can be mitigated. It is shown, also, that the introduction of plasmonic materials leads to an enlargement of the angular bandwidth, with a reduction of the overall dimensions of the component.

INTRODUZIONE

Lo sviluppo di nuove tecnologie per il miglioramento di dispositivi fotovoltaici è attualmente una delle maggiori sfide nell'ambito delle energie rinnovabili. Tra tutte le possibili fonti di energia rinnovabile quella solare è senza dubbio quella a minor impatto ambientale.

Il principio di funzionamento di una cella fotovoltaica è relativamente semplice: i fotoni provenienti dalla luce solare vengono assorbiti da opportuni materiali dove è possibile generare coppie elettrone-lacuna. Cariche di segno opposto possono subire fenomeni di separazione, trasporto e diffusione all'interno dei materiali assorbenti, mentre una coppia di elettrodi stabilisce la differenza di potenziale necessaria per far fluire la corrente nel dispositivo.

I dispositivi fotovoltaici di prima generazione sono costituiti da semplici giunzioni p-n realizzate in silicio mono o poli-cristallino, che permettono di raggiungere efficienze di conversione della radiazione solare dell'ordine del 10%.

I dispositivi fotovoltaici di seconda generazione sono basati, invece, su tecnologie in film sottile. I dispositivi di seconda generazione hanno sostanzialmente due scopi: la riduzione dei costi rispetto ai dispositivi di prima generazione ed il raggiungimento di efficienze più elevate, tramite l'utilizzo di materiali relativamente assorbenti e a basso costo.

Oggigiorno le attività di ricerca più avanzate sono concentrate sul superamento dei limiti tecnologici e di efficienza propri dei dispositivi fotovoltaici di prima e seconda generazione al fine di individuare dispositivi di terza generazione con bassi costi di fabbricazione.

Con questo contributo si vuole proporre una nuova possibile soluzione, basata sull'impiego di materiali plasmonici [1-6] e di tecnologie economicamente convenienti, per una significativa riduzione di due dei maggiori limiti delle attuali tecnologie in commercio: la presenza di riflessioni all'interfaccia di ingresso della cella e lo scarso assorbimento della radiazione solare da parte dei pannelli fotovoltaici.

I dispositivi plasmonici/metallo-dielettrici rappresentano un punto di svolta grazie ai costi contenuti ed alla loro potenziale alta efficienza nell'ambito delle celle fotovoltaiche. In particolare le strutture metallo-dielettrico opportunamente progettate si possono comportare o come filtri spettrali o come polarizzatori dalle elevate prestazioni, facendo intravedere la possibilità di superare due dei maggiori ostacoli delle attuali tecnologie in commercio. La forte focalizzazione di campo all'interno di tali strutture, infatti, permette di ridurre la riflessione all'interfaccia di ingresso della cella e di aumentare selettivamente in frequenza l'assorbimento dei materiali attivi impiegati. Insieme a questi vantaggi tali dispositivi permettono di ridurre altresì le dimensioni delle fotocelle.

FILTRI SPETTRALI

In questa Sezione si propone una nuova classe di filtri elettromagnetici realizzati con materiali plasmonici a basse perdite per la scomposizione spettrale della radiazione solare. In base a tale principio si conta di aumentare l'efficienza energetica dell'intero sistema mediante l'azione combinata delle diverse componenti spettrali della radiazione solare. Ad esempio, una parte del contenuto spettrale della radiazione solare può essere utilizzata per l'ottenimento diretto di idrogeno dall'acqua mentre la rimanente parte può essere impiegata, mediante opportuni convertitori fotovoltaici o impianti solari termodinamici, per la produzione di energia elettrica.

In questo contributo dimostriamo che l'uso di materiali artificiali con caratteristiche plasmoniche e realizzati mediante

processi costruttivi a basso costo può portare alla realizzazione di sistemi caratterizzati da:

1. basse perdite
2. elevata efficienza energetica
3. elevata larghezza di banda angolare

Per quanto riguarda l'ultimo punto, è noto che nell'ambito degli impianti fotovoltaici, quelli che utilizzano la tecnologia ad inseguimento solare presentano un rendimento maggiore rispetto a quelli ad orientamento fisso in quanto riescono a sfruttare costantemente la massima radiazione solare incidente sul pannello. Gli aspetti negativi degli inseguitori solari si manifestano nei problemi meccanici a cui vanno inevitabilmente incontro con l'usura del tempo, con i conseguenti fermi impianto causati. I servomeccanismi degli inseguitori sono organi poco sollecitati, ma sottoposti per loro natura a condizioni atmosferiche gravose per almeno 20 anni. A questo va sommato un consumo elettrico intrinseco che può inficiare sensibilmente il rendimento economico dell'intero sistema. Appare, quindi, evidente l'utilità di utilizzare lamine piane di nuova concezione opportunamente progettate per focalizzare un campo elettromagnetico a larga banda nel caso di incidenza obliqua quale è la radiazione solare.

FORMULAZIONE DEL PROBLEMA ELETTROMAGNETICO

Si consideri una struttura periodica composta dalla ripetizione di un coppia di strati sottili e paralleli, di permittività ε_1 ed ε_2 e spessori d_1 e d_2, disposti come in Figura 1. Nell'ipotesi che il periodo spaziale sia sufficientemente piccolo rispetto alla lunghezza d'onda, la struttura può essere trattata come un mezzo efficace, caratterizzato da un tensore permittività pari a [7]:

$$\underline{\boldsymbol{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{//} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{//} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\perp} \end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Gli elementi di $\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}$ dipendono esclusivamente dalle permittività dei materiali costituenti e dalla geometria della struttura (in particolare dal rapporto tra gli spessori degli strati) [8, 9]:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\perp} = \dfrac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{f_1 \varepsilon_2 + f_2 \varepsilon_1} \\ \varepsilon_{//} = f_1 \varepsilon_1 + f_2 \varepsilon_2 \end{cases} \qquad (2)$$

essendo f_1 ed f_2 le frazioni del volume totale occupato dai due strati:

$$\begin{cases} f_1 = \dfrac{d_1}{d_1 + d_2} \\ f_2 = \dfrac{d_2}{d_2 + d_1} = 1 - f_1 \end{cases} \qquad (3)$$

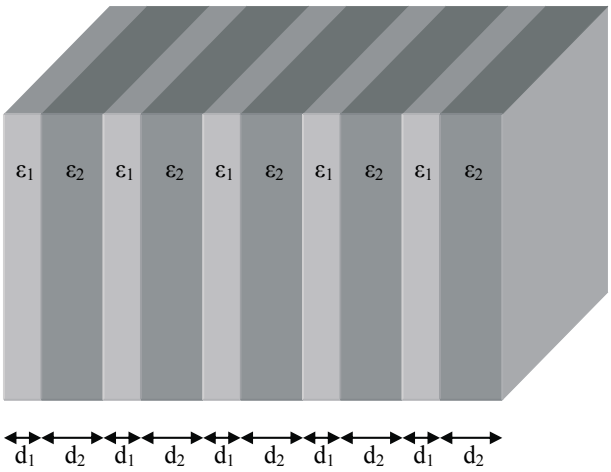


Figura 1: Lamina dielettrica composta da un'alternanza di materiali plamonici e non plasmonici.

Combinando opportunamente due materiali differenti si è, quindi, in grado di realizzare un mezzo equivalente, la cui permittività presenti valori inconsueti.

In particolare, utilizzando per i due materiali costituenti un metallo ed un dielettrico standard, si possono determinare i valori degli spessori, in modo tale che si comporti come un mezzo efficace equivalente Epsilon-Near-Zero (ENZ), vale a dire con permittività equivalente nulla ($\varepsilon_{eff} = 0$), alle frequenze di interesse.

La trattazione può essere facilmente estesa a mezzi stratificati la cui cella unitaria sia composta da tre strati differenti. In questo caso la permittività efficace per tutte le direzioni parallele agli strati sarà:

$$\begin{cases} \varepsilon_{//} = f_1 \varepsilon_1 + f_2 \varepsilon_2 + f_3 \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{\perp} = \dfrac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3}{f_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 + f_2 \varepsilon_1 \varepsilon_3 + f_3 \varepsilon_1 \varepsilon_2} \end{cases} \qquad (4)$$

in cui

$$\begin{cases} f_1 = \dfrac{d_1}{d_1 + d_2 + d_3} \\ f_2 = \dfrac{d_2}{d_1 + d_2 + d_3} \\ f_3 = \dfrac{d_3}{d_1 + d_2 + d_3} \end{cases} \qquad (5)$$

Anche in questo caso si possono ottenere mezzi ENZ che permettono di ottenere filtri spaziali altamente selettivi.

Come già detto nell'introduzione, le applicazioni dei materiali stratificati ora presentati non si limitano ai filtri spaziali ma possono trovare impiego anche nella realizzazione di polarizzatori ad alta efficienza ed elevata larghezza di banda angolare.

Un generico polarizzatore può essere progettato, ad esempio, per essere il più possibile:

trasparente al campo elettromagnetico incidente quando questo è polarizzato TE:

$$\begin{cases} S_{21}^{TE} \geq -3 \text{ dB} \\ S_{11}^{TE} \leq -30 \text{ dB} \end{cases}$$

opaco al campo elettromagnetico incidente quando questo è

polarizzato TM:

$$\begin{cases} S_{11}^{TM} \geq -3 \text{ dB} \\ S_{21}^{TM} \leq -30 \text{ dB} \end{cases}$$

Si può dimostrare che le condizioni di cui sopra possono essere verificate se:

$$\begin{cases} \varepsilon_{//} < 0 \\ |\varepsilon_{//}| \gg 1 \end{cases} \quad (6)$$

RISULTATI NUMERICI

Come primo esempio numerico si considera una struttura multistrato composta da un'alternanza di strati sottili di materiale plasmonico, modellato con un andamento dispersivo della permittività del tipo:

$$\varepsilon_1 = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \quad (7)$$

essendo ω_p la pulsazione di plasma e di un dielettrico standard con $\varepsilon_2 = \varepsilon_r$. L'annullamento della $\varepsilon_{//}$ si ha alla frequenza:

$$\omega_0 = \omega_p \sqrt{\frac{d_1}{d_1 + \varepsilon_r \, d_2}} \quad (8)$$

Per ottenere l'annullamento della $\varepsilon_{//}$ alla frequenza di 400 THz ossia nella banda del visibile (Figura 2) si può utilizzare una struttura multistrato composta da tre coppie di strati riempiti d'argento ($\omega_p = 2.17 \times 10^{15}$ s^{-1}) e di silicio ($\varepsilon_r = 11.4$ alle frequenze ottiche) di spessore pari a 25 nm e 62 nm, rispettivamente.

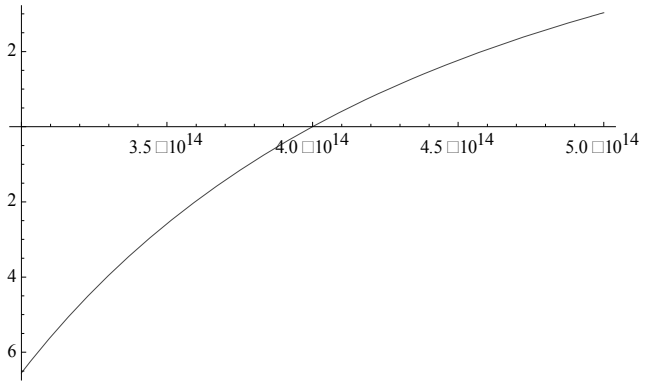


Figura 2: Permittività relativa del mezzo efficace ($\omega_p = 2.17 \times 10^{15}$ s^{-1}, $d_1 = 25$ nm, $\varepsilon_r = 11.4$, $d_2 = 62$ nm).

Anche nel caso di struttura periodica a tre strati si può ottenere nuovamente un comportamento ENZ, utilizzando un metallo e due dielettrici standard. L'uso di tre strati opportunamente dimensionati (Figura 3) può portare ad un allargamento dell'intervallo di frequenze dove si manifesta il comportamento ENZ (Figura 4).

In Figura 3 vengono mostrate le curve di livello della derivata della permittività valutata alla frequenza di annullamento in funzione dei valori della costante dielettrica dei due materiali dielettrici. A colori più scuri corrispondo valori più piccoli della derivata e quindi intervalli di frequenza più grandi dove si manifesta il comportamento ENZ.

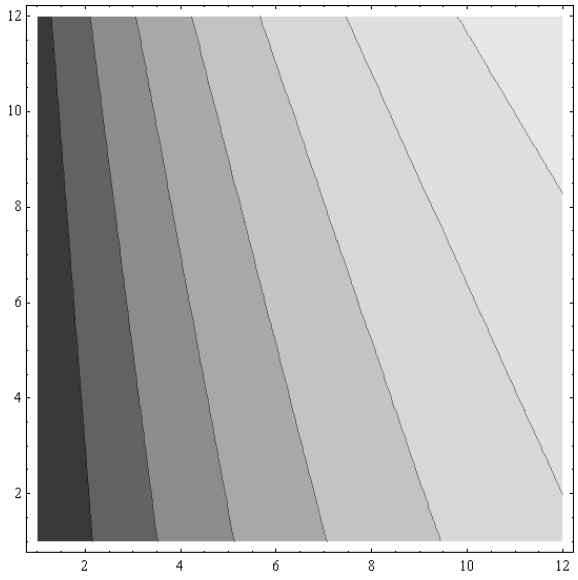


Figura 3: Derivata della permittività del mezzo efficace costituito da Dielettrico 1–Argento– Dielettrico 3 in funzione delle costanti dielettriche dei due strati dielettrici ($\omega_p = 2.17 \times 10^{15}$ s^{-1}, $d_1 = d_2 = 25$ nm).

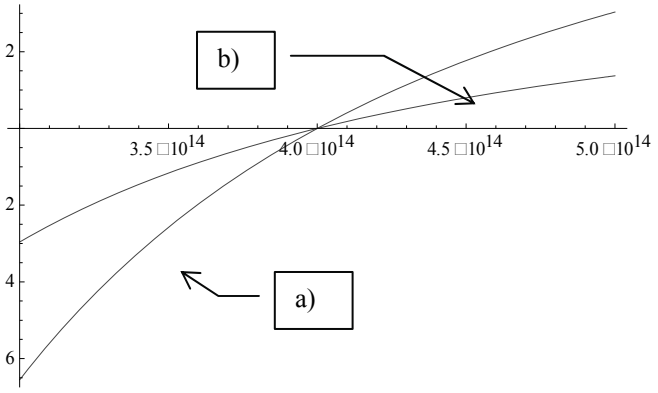


Figura 4: Permittività del mezzo efficace costituito da a) Allumina–Argento–Silicio ($\omega_p = 2.17 \times 10^{15}$ s^{-1}, $d_1 = d_2 = 25$ nm, $d_3 = 44$ nm, $\varepsilon_{r1} = 9.7$, $\varepsilon_{r3} = 11.4$), b) Carburo di Silicio–Argento–Carburo di Silicio ($\omega_p = 2.17 \times 10^{15}$ s^{-1}, $d_1 = d_2 = 25$ nm, $d_3 = 84$ nm, $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r1} = 6.5$).

Poiché la struttura sotto analisi soddisfa i criteri di omogeneizzazione, è lecito attendersi che i parametri efficaci non cambiano invertendo l'ordine degli strati costituenti. I materiali artificiali ora progettati possono essere impiegati con successo nella sintesi di filtri spaziali altamente selettivi.

Si mostrano di seguito alcuni risultati numerici relativi ad un polarizzatore progettato per operare nella banda del visibile.

Il polarizzatore viene realizzato utilizzando una struttura stratificata, composta da un'alternanza di lamine dielettriche isotrope spesse d_1 e d_2 riempite, rispettivamente, di materiale plasmonico (argento) e dielettrico tradizionale (carburo di silicio, caratterizzato da una permittività $\varepsilon_2 = 6.52$).

In Figura 5 e

Figura 6 sono riportati il coefficiente di riflessione e trasmissione per incidenza TE in funzione della frequenza e per diversi angoli di incidenza. La struttura è completamente riflettente alla frequenza di progetto $f_0 = 675$ THz quando il campo elettromagnetico incidente è polarizzato TE.

È opportuno sottolineare che la struttura mantiene le capacità di polarizzazione anche per angoli di incidenza molto grandi, pari circa a 75°.

Il campo elettromagnetico polarizzato TE non penetra all'interno del pannello fotovoltaico e viene completamente riflesso per angoli di incidenza superiori ai 75°. Risultati duali si ottengono nel caso di incidenza TM. Questi ultimi non sono mostrati in questo lavoro per esigenze di spazio e verranno presentati alla conferenza.

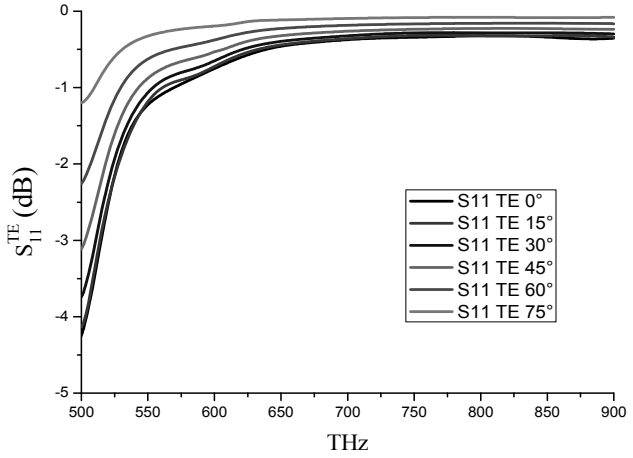


Figura 5: Coefficiente di riflessione per incidenza TE per un polarizzatore realizzato con una struttura multistrato (i mezzi utilizzati sono l'Argento l'argento (Ag) e il carburo di silicio (SiC) con le seguenti dimensioni $d_1 = d_2 = 11.65\,\text{nm}$).

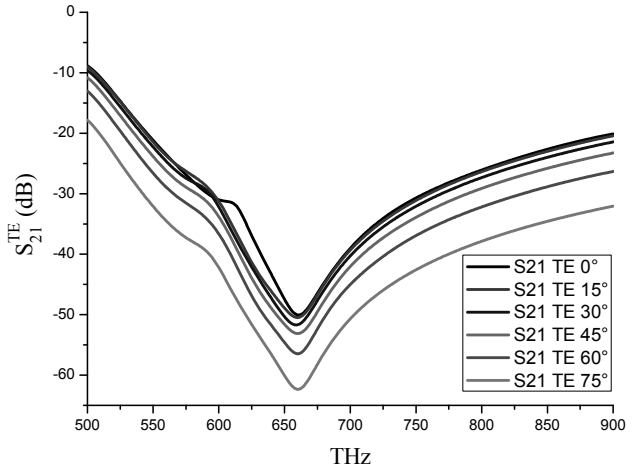


Figura 6: Coefficiente di trasmissione per incidenza TE per un polarizzatore realizzato con la struttura multistrato di Figura 5.

CONCLUSIONI

In questo contributo si è mostrato come utilizzare i materiali plasmonici in configurazione stratificata per affrontare due dei problemi più significativi delle attuali tecnologie in commercio utilizzate nella produzione dell'energia tramite processi fotovoltaici: l'innesco di riflessioni indesiderate all'interfaccia di ingresso della cella e l'insufficiente assorbimento della potenza elettromagnetica della radiazione solare da parte dei materiali impiegati comunemente come pannelli fotovoltaici.

Si è proposto l'impiego di strutture stratificate periodiche in presenza di un'alternanza tra stati riempiti di materiale plasmonico e di materiale dielettrico per la realizzazione di pellicole che riducono praticamente a zero le riflessioni all'interfaccia aria-pannello fotovoltaico e di polarizzatori del campo elettromagnetico più piccoli e con migliori caratteristiche di banda rispetto a quelli realizzati tramite l'impiego di materiali tradizionali.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ," Soviet Physics Uspekhi, vol. 10, no. 4, pp. 509– 514, 1968.
2. R.A. Shelby, D.R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," Science, vol. 292, no. 5514, pp. 77–79, 2001.
3. "Breakthrough of the year: The runners-up," Science, vol. 302, no. 5653, pp. 2039–2045, 2003.
4. J.B. Pendry, A. J. Holden, D.J. Robbins, and W.J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume 47, Issue 11, Nov. 1999, pp. –2084.
5. F. Bilotti, A. Toscano, L. Vegni, K. Aydin, K.B. Alici, E. Ozbay, "Equivalent-Circuit Models for the Design of Metamaterials Based on Artificial Magnetic Inclusions," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume 55, Issue 12, Part 2, Dec. 2007, pp. 2865–2873.
6. F. Bilotti, A. Toscano, L. Vegni, "Design of Spiral and Multiple Split-Ring Resonators for the Realization of Miniaturized Metamaterial Samples," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 55, Issue 8, Aug. 2007, pp. 2258–2267.
7. S.J. Orfanidis, Electromagnetic Wave and Antennas, http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/, 2008.
8. L.R. Lewis, A. Hessel, "Propagation Characteristics of Periodic Arrays of Dielectric Slabs," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-19, p. 276, 1971.
9. J.P. van der Ziel, M. Illegems and R.M. Mikulyak, Optical birefringence of thin GaAs-AlAs multilayer films, Appl. Phys. Lett., vol. 28, p. 735, 1976

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SUNFLOWER AND RAPESEED CULTIVATION FOR BIODIESEL PRODUCTION

Franco Cotana[1], Marco Barbanera[1], Francesco Fantozzi[1],

[1]Biomass Research Centre, University of Perugia
Str. S.Lucia Canetola – 06125 Perugia, Italy

SUMMARY

A Life Cycle Assessment for sunflower and rapeseed cultivation was performed in order to assess the environmental impacts both in terms of greenhouse gas emissions balance and global ecological burden and to quantify the GHG emissions mitigation, thanks to the return to the field of crop residues. The analysis considered all field operations and 1 MJ of biodiesel (obtainable from the oleaginous seeds) energy content was assumed as functional unit. Inventory data were obtained from EcoInvent database and from an Umbrian farm which cultivates oleaginous species. As regards the carbon and nitrogen emissions produced by tillage operations and nitrogen fertilizers application, the DNDC (DeNitrification and DeComposition) model was used. DNDC simulates a full carbon and nitrogen balance, including different C and N pools, and the emissions of all relevant trace gases from soils. Specific climate data, soil properties and cropping practices were used to run the model. All input and output data were collected to carry out the environmental analysis, using a detailed LCA software (Simapro 7.0) and adopting EcoIndicator 99 as environmental impact assessment method. Results showed that rapeseed cultivation was characterized by an higher environmental impact, both in terms of GHG balance and global ecological burden.

INTRODUCTION

Agricultural activity is responsible for environmental concern, causing high nitrate concentrations in water, emitting ammonia into the atmosphere and contributing to increase *GHG* concentration in the atmosphere.

Actually recommended procedures for the estimation of these emissions have a large uncertainty range, above all because of their lack of models to differentiate site-specific conditions.

Therefore it would be interesting to develop models able to simulate the complex interactions occurring between the environment and anthropogenic activities.

The EU Directive on the promotion of Renewable Energy [1] increased attention towards the environmental performance of energy crops for biofuel production: only biofuels that achieve greenhouse emissions savings of 35% will be eligible for inclusion in the 2020 target of 10% for the share of biofuels.

In particular, the cultivation phase is considered as one of the main difficult to quantify from the *GHG* emission balance point of view.

In this paper it was analyzed the environmental impact (in terms of ecological and *GHG* emission balance), through Life Cycle Assessment (*LCA*) methodology [2, 3], of two oleaginous crops, sunflower and rapeseed, dedicated to biodiesel production.

The analysis was site-specific with inventory data taken from an Umbrian farm and fluxes of carbon and nitrogen from the soil obtained applying the *DNDC* (Denitrification Decomposition) model [4], that has been shown to be especially sensitive to soil organic matter (*SOM*) content and nitrogen fertilizer application rates.

LIFE CYCLE ASSESSMENT

Life Cycle Assessment was carried out with the assistance of a commercial *LCA* software package, SimaPro 7.0. It is an open structure program that can be used for different types of life cycle assessments. The production stage, the use stage and the end of life scenario can be specified in as much detail as necessary by selecting processes from the database and by building processes trees, which can be drawn by the program.

LCA studies are composed of several interrelated components: goal definition and scoping, inventory analysis, impact assessment and improvement assessment. In the following, each step is described with regard to this work.

Goal and scope definition

In this paper it was analyzed the environmental impact of the cultivation of sunflower and rapeseed crops, dedicated to biodiesel production. In particular the influence on the *GHG* emission balance of crop residues return into the soil was evaluated. Incorporating crop residues into the ploughed layer of soil affects the dynamics of carbon and nitrogen. A precise quantification of its short-term effect in agricultural fields is difficult, because biological and physical processes interact and take place simultaneously. The functional unit of the life cycle analysis was 1 MJ of biodiesel (in terms of the energy content of biofuel).

The systems under consideration in this study include the agricultural operations for the cultivation of sunflower and rapeseed. Fig. 1 shows a diagram of the production stages of the two crops.

The construction of the machineries for crops cultivation was not taken into account as well as the impact associated with the production of the oleaginous seeds.

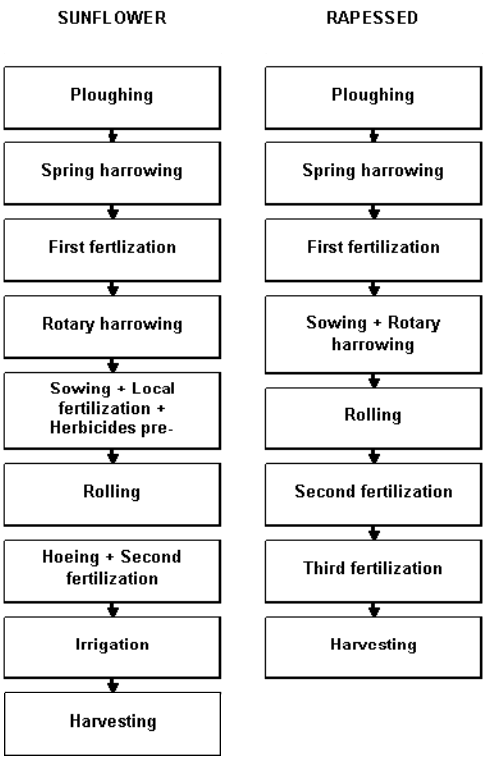


Figure 1: Agricultural operation for the cultivation of sunflower and rapeseed

Inventory analysis

The inventory analysis is the quantitative description of all material and energy flows across the system boundary either into or out of the system itself. Data for the agricultural operations (tab. 1, 2) were drawn from an Umbrian farm, located in Spoleto, characterized by an extent of about 1.000 hectares. The number of irrigation cycles and the period of each agricultural operation were established considering the situation in the mean climate conditions; the following emissions in air, soil and water produced by farm management practices were considered: air emissions produced by diesel engines [5], heavy-metal soil emissions from tyre abrasion [5], ammonia, dinitrogen monoxide and NO_x air emissions from the application of nitrogen fertilizers, phosphates water emissions from the application of phosphate fertilizers [6], *VOC* air emissions from the application of herbicides [7] and soil pollution deriving from herbicides remained into the soil [7]

All energy and mass flows were referred to 1 ha of cultivated soil and then were ascribed to the considered function unit, assuming the following hypothesis:

- sunflower: 0.435 kg oil/kg seed [8];
- rapeseed: 0.405 kg oil/kg seed [8];
- Lower Heating Value of biodiesel: 37.2 MJ/kg oil [8].

Air emissions produced by diesel engines.

Emissions to air from combustion of the fuel in agricultural machineries were calculated applying the methodology described in [5], multiplying the fuel consumption of each work process by the relative emission factor.

Soil emissions from tyre abrasion.

The heavy-metal (zinc, lead and cadmium) emissions from tyre abrasion were calculated taking into account the number of tyre sets used during the lifetime of the machinery, according to [5].

Nitrogen compound emissions from fertilizer applications.

Emissions of NH_3, N_2O e NO_X due to the nitrogen fertilizer applications were estimated through the application of the biogeochemistry model *DNDC* (DeNitrification DeComposition), which allows to simulate *GHG* fluxes, carbon stock changes and the nitrogen budget of the agricultural soil.

Emissions of phosphorus into the water.

A part of the phosphorus applied with mineral fertilizers is lost to water due to run-off of soluble phosphate to surface water. The methodology used to calculate phosphate emissions is described in [6] and results were: 0.39 kg/ha for sunflower and 0.22 kg/ha for rapeseed.

Emissions from herbicides applications.

The method [7] employed for estimating *VOC* emissions in air and remaining herbicides in soil uses the vapor pressure of the active ingredient to determine the appropriate emission factor, the amount of herbicide applied and the percent of the active ingredient in the herbicide applied. Results for sunflower cultivation were 59 g/ha of *VOC* in air and 180 g/ha of herbicide in soil.

***DNDC* model**

DNDC is a biogeochemistry model for agro-ecosystems that can be applied both at the plot-scale and at the regional scale. It consists of three major sub-models: (1) soil climate, (2) crop growth and (3) soil biogeochemistry, including sub-modules for decomposition of organic material, nitrification, denitrification, and fermentation [4]. It is able to track the fate of nitrogen, carbon and water in the rooting zone of the soil, simulating all relevant fluxes including, for the example of nitrogen, uptake and export with the harvest, recycling through decomposition of crop residues, losses below the rooting zone and to the river system through leaching and run-off and gaseous losses of NH_3, NO_x, N_2O, and N_2. The model is driven by environmental (daily weather), ecological (nitrogen deposition) and management (land use, fertilizer application, field operations) factors and simulates the controlling processes on the basis of the characteristics in the soil profile, which must be initialized with information on soil organic carbon content, pH, bulk density and texture.

The crop growth module covers crop development, photosynthesis, root growth and biomass partitioning. Nitrogen uptake by vegetation is the key process linking crop growth with climate and soil status. It is regulated by four factors: (i) the crop potential maximum yield, which is defined as the optimum grain carbon-yield of a crop growing with sufficient water and nitrogen supply; (ii) the crop C:N ratio; (iii) the crop growth curve; (iv) the availability of dissolved inorganic nitrogen in the soil. Decomposition is simulated with a pool model for litter, microbial biomass and humads of different resistances to degradation, respectively.

Biogeochemistry in *DNDC* follows the production and consumption of NO, N_2O and N_2 in the nitrification-denitrification chain. Emissions of NO and N_2O from nitrification are calculated as a function of the predicted nitrification rate and temperature. Both methane production during fermentation of organic matter and methane oxidation by methanotrophic bacteria are represented in the model, as well as the transport of methane in paddy soils. Emissions of NH_3 are instead calculated as fluxes from the soil, related to the clay content and the NH_3 concentration and as releases from the plants.

Table 1: Agricultural operations for sunflower cultivation.

Agricultural operations	Diesel (l/ha)	Materials	Date	Notes
Ploughing	30		27 September	Depth: 25-30 cm
Spring harrowing	20		15 January	Depth: 40-45 cm
First fertilization	0,5	diammonium phosphate: 200 kg/ha	10 March	
Rotary harrowing	20		12 March	Depth: 5-7 cm
Sowing + Local fertilization + Herbicides pre-emergency	5,5	monoammonium phosphate: 20 kg/ha Oxyfluorfen: 0,5 kg/ha	10 April	
Rolling	3		15 April	
Hoeing + Second fertilization	10	urea: 300 kg/ha	7 May	
Irrigation	176,5	water: 4200 m^3/ha	15 May – 31 August	Number of cycles: 15 Water ph: 7.3
Harvesting	30		15 September	
Transports	11,25			

Table 2: Agricultural operations for rapeseed cultivation.

Agricultural operations	Diesel (l/ha)	Materials	Date	Notes
Ploughing	30		5 July	Depth: 25-30 cm
Spring harrowing	20		1 September	Depth: 40-45 cm
First fertilization	0,5	NPK (8-24-24): 300 kg/ha	15 September	
Sowing + Rotary harrowing	22,5		30 September	Depth: 5-7 cm
Rolling	3		5 October	
Second fertilization	0,5	ammonium sulphate: 200 kg/ha	15 February	
Third fertilization	0,5	ammonium nitrate: 200 kg/ha	15 March	
Harvesting	30		20 June	
Transports	11,25			

Input data for the *DNDC* model.

The site-specific input data for *DNDC* includes climate data, soil properties, farm management activities (defined in tables 1 and 2) and crop properties.

The main parameters introduced in the model about climate were: latitude (42.77°), daily low temperature, daily high temperature, daily precipitation (fig. 2) and daily solar radiation (fig. 3). Data were drawn from the National Agro-meteorological Data Bank [9], referring to a meteorological station located at Marsciano. In particular, for each input, mean data for the last five years was considered.

DNDC requires also some soil properties (i.e. bulk density, *SOC* content, texture, pH); Data adopted in our database were in part collected from geological report and chemical-physical analysis of the soil while in part were assumed default data, because of the lack of information. Soil data constitute a major source f uncertainty for the simulations, because of some of them, such as especially initial *SOC* content, are the most sensitive factors for estimating *SOC* dynamics. Soil data obtained from direct analysis were:

- soil texture: clay loam, with a clay fraction of 0.417;
- bulk density: 1.81 g/cm^3;
- soil pH: 7.91;
- macro-pores: absent;
- water logging problem: absent;
- depth of water retention layer: 2.2 m;
- highest groundwater table depth: 3.6 m;
- *SOC* at surface soil (0-5 cm): 0.012 kgC/kg;
- depth of top soil with uniform *SOC* content: 0.3 m;
- bulk C/N: 9.5;
- slope: 4%.

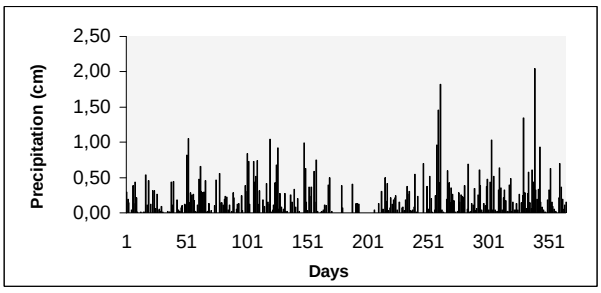


Figure 2: Daily precipitation at Marsciano meteorological station (mean values in the period 2003-2007).

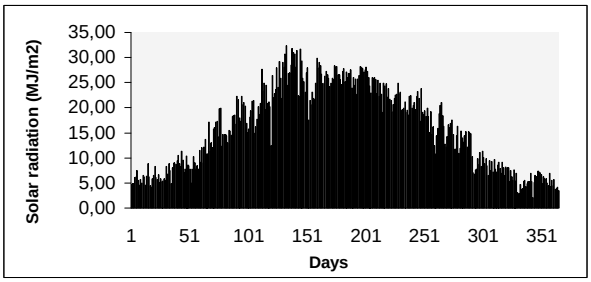


Figure 3: Daily solar radiation at Marsciano meteorological station (mean values in the period 2003-2007).

Crop parameters were taken from the default values provided by *DNDC* (potential biomass yield; grain:shoot:root biomass ratios; tissue C:N ratios; water use efficiency; crop growth and crop phenology) only modifying the maximum production yield of seeds (3 t/ha with a moisture content of 12%, both for sunflower and rapeseed). In tables 3 and 4 the main assumptions for the two crops are reported.

Results of the *DNDC* model.

Simulation was conducted for one year for sunflower and for two years for rapeseed (because it was sowed at 30 September and harvested at 20 June), evaluating carbon, nitrogen and water balances.

Table 3: Crop parameters for sunflower.

Crop parameters	Seed	Leaf+stem	Root
Maximum biomass (kgC/ha)	1073.6	2397.7	107.4
Biomass fraction	0.3	0.67	0.03
Biomass C/N ratio	10	45	50
Total N demand (kgN/ha)	162.8		
Thermal degree days	1500		
Water demand (gH_2O/gDryMatter)	495		
N fixation index	1		
Maximum LAI	3		

Table 4: Crop parameters for rapeseed.

Crop parameters	Seed	Leaf+stem	Root
Maximum biomass (kgC/ha)	1056	3168	367.3
Biomass fraction	0.23	0.69	0.08
Biomass C/N ratio	12	45	52
Total N demand (kgN/ha)	165.5		
Thermal degree days	700		
Water demand (gH_2O/gDryMatter)	450		
N fixation index	1		
Maximum LAI	4		

As regards seed yield, a lower value than the theoretical maximum was obtained, perhaps because of presence of temperature stress: 2.25 t/ha for sunflower and 1.90 t/ha for rapeseed. Tab. 5 shows the summary output results of the simulation for sunflower and rapeseed crops.

Table 5: Main parameters of crops growth, obtained from *DNDC* simulation.

Parameters	Sunflower	Rapeseed
Maximum grain (kgC/ha)	1074	1056
Actual grain (kgC/ha)	826	673
Maximum leaf+stem (kgC/ha)	2398	3168
Actual leaf+stem (kgC/ha)	1845	2018
Maximum root (kgC/ha)	107	367
Actual root (kgC/ha)	83	234
Water demand (mm)	821	355
Water uptake (mm)	646	309
N demand (kgN/ha)	163	165
N uptake (kgN/ha)	125	105
Temperature demand (°C)	1500	700
Thermal degree days (°C)	1512	703

Results of nitrogen compounds emissions and *SOC* balance, in the case in which all crop residues are left in the field after harvest, are reported in table 6.

Among the nitrogen compounds emitted in the atmosphere, N_2O is one of the most important gases contributing to the greenhouse effect, so its estimation is of primary importance.

Table 6: Nitrogen and carbon balances, obtained from *DNDC* simulation.

Substances	Sunflower	Rapeseed
	Air	
N_2O (kg/ha)	1.34	2.04
NO_x (kg/ha)	3.66	1.50
NH_3 (kg/ha)	4.87	48.08
N_2 (kg/ha)	0.20	0.03
	Water	
NO_3 (kg/ha)	84.58	44.55
	Soil	
Change in C storage (kgC/ha)	790.50	736.40

The main methodology to determine N_2O emissions from fertilizers application was developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [10]. The methodology provides a framework for the calculation of the total N inputs from agriculture (fertilizers, animal excreta, crop residues). The N input in each component is multiplied by an emission factor (EF) (which specifies the proportion of N input emitted as N_2O), to give a total emission. The EF for fertilizer is 0.0125 kg N_2O-N per kg N applied.

This approach is obviously generalized and simple, since it is intended for global application. However, the IPCC methodology is not sufficiently flexible to allow mitigation options to be assessed. In addition, the EF is drawn from international datasets and it is therefore general and not necessarily specific to the soils, climate and farming practices of the considered soil.

Ammonia (NH_3) is the dominant gaseous base in the atmosphere and a principal neutralizing agent for atmospheric acids. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizer application is site-specific, like N_2O emissions; in fact actual NH_3 emission factors are determined by fertilizer placement, application period, soil temperature, soil moisture, wind, precipitation and soil pH. For these reasons the use of an emission factor, depending only on the nitrogen content of fertilizer (15% of N-content, for urea) [10], determines a substantial error.

Impact assessment methodology

Impact assessment was carried out considering eleven impact categories (carcinogens, respiratory organics, respiratory inorganics, climate change, radiation, ozone layer, ecotoxicity, acidification/eutrophication, land use, minerals, fossil fuels). Finally, the application of weighting factors to determine the relative importance, or seriousness, of a category results may be represented as a single score, in eco-indicator points (Pt).

In this study the impact assessment and characterization has been performed by the *LCA* method EcoIndicator 99 [11]. The index chosen for the impact assessment is the hierarchist's version, with average weighting set, which represents the most balanced view amongst all the perspectives on nature.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 7 shows the global eco-scores for sunflower and rapeseed cultivation for each impact categories. It can be noted that in both cases about 80% of the ecological effects of the crop production are related to land use category.

Table 7: Ecological impacts for Impact Categories (in *mPt*)

Impact category	Rapeseed	Sunflower
Total	40.6	29.9
Respiratory organics	0.0	0.0
Respiratory inorganics	4.2	1.5
Climate change	0.3	0.2
Radiation	0.0	0.0
Ozone layer	0.0	0.0
Ecotoxicity	0.2	0.1
Acidification/Eutrophication	2.2	0.3
Land use	31.3	24.6
Minerals	0.0	0.0
Fossil fuels	2.1	3.1
Total	***40.6***	***29.9***

As this category is a qualitative and not a quantitative indicator like the other mass and energy flows, its implementation into the overall assessment is quite complicated. Within the agricultural production system, the influence of the impact category land use is very strong, in comparison to all other ecological effects on the overall result. On one hand, large areas are needed for the production of energy crops; this has a multiplying effect on the results per unit area: the intensive arable production leads to decrease in biodiversity, which is close to the decrease caused by a sealed surface. Therefore this form of production is calculated with heavy ecological burdens. On the other hand, it must be recognized that there would also be arable production, even if no energy crops would be produced. Hence, stopping the production of energy crops would not lead to an overall reduction of ecological effects from arable farming.

Therefore it seemed to be more interesting to compare the ecological impacts of the two chains excluding land use category from the assessment. In this way, rapeseed cultivation is characterized by an ecological impact of 9.3 *mPt*, while the value for sunflower is equal to 5.3 *mPt*.

For both crops, the main impact categories are represented by Respiratory Inorganics (rapeseed: 46% of the total impact, sunflower: 28%), Acidification/Eutrophication (rapeseed: 24%, sunflower: 6%), Fossil fuels (rapeseed: 23%, sunflower: 58%) and Climate change (rapeseed: 3%, sunflower: 4%). For rapeseed, the main contribution to the Respiratory Inorganics category is represented by ammonia emission (67%) from nitrogen fertilizers application, while for sunflower particulate emission from diesel combustion amount to 47%. The impact of Acidification/Eutrophication category is mostly due to ammonia and nitrogen oxides emissions from nitrogen fertilizer application (94% and 6% respectively for rapeseed, 59% and 40% for sunflower). The score of Fossil Fuels category is produced by natural gas and oil crude consumptions (42% and 58% respectively for rapeseed, 35% and 65% for sunflower). At last, for rapeseed the main contributions to the climate change category are constituted by GHG emissions from nitrogen fertilizers application (31%) and from ammonium nitrate production (26%), while for sunflower GHG emissions from diesel consumption in the irrigation step and nitrogen fertilizers application amount to 26% and 22% respectively. In particular it seemed interesting to report GHG emissions, in terms of gCO_2eq/MJ, according to IPCC (100-years) methodology; the score obtained for rapeseed cultivation is equal to 67 gCO_2eq/MJ against 50 gCO_2eq/MJ for sunflower.

CONCLUSIONS

The *LCA* analysis of rapeseed and sunflower cultivation was carried out, considering the overall process, from field preparation to seed harvesting. Data for each phase were obtained from an Umbrian farm, from the Literature (energy and mass flows of life-cycle production of employed materials) and by calculation.

The environmental analysis was conducted in terms of ecological impact, applying the EcoIndicator 99 method, and of GHG balance, adopting the IPCC (100-years) methodology. In particular, site-specific nitrogen and carbon balances were performed, employing *DNDC* model; the contribution to the carbon storage in the field of crop residues incorporation into the soil was also evaluated.

The ecological analysis showed that sunflower cultivation was characterized by a lower impact than rapeseed farming, both including land use impact category (-26.4%) and excluding it (-43.0%); the difference between the two scenarios was due to the higher oil yield of sunflower than rapeseed. Results obtained for rapeseed crop were biased by the climate data considered, bringing about a lower seed yield than Literature data [12] (2.5-3 t/ha).

As regards GHG balance evaluation, rapeseed farming showed higher GHG emissions than sunflower (+25.4%). Scores obtained for the two crops were higher than those reported in the EU Directive (49 gCO_2eq/MJ for rapeseed and 39 gCO_2eq/MJ for sunflower) in terms of absolute values. The main differences in the input data concern diesel consumption, nitrogen fertilizer application rate and mainly seed yield (3.1 t/ha for rapeseed and 2.4 t/ha for sunflower).

This study represent a first attempt to determine the environmental impact of biofuel crops, assuming site-specific data relative to climate conditions and soil properties of the Umbria region. Therefore, considering the Italian next acknowledgement of EU Directive, this analysis would be extended to other climate regions and to other biofuel crops, using more thorough input data; in this way it could be obtained default values of GHG emissions of cultivation phase for Italian regions.

NOMENCALTURE

DNDC: DeNitrification and DeComposition;
GHG: GreenHouse Gas;
LCA: Life Cycle Assessment;
mPt: milliPoint;
SOC: Soil Organic Carbon [kg C/kg soil];
SOM: Soil Organic Matter;
VOC: Volatile Organic Compounds.

REFERENCES

1. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
2. ISO 14040:2006 Environmental management – Life Cycle Assessment - Principles and framework.
3. ISO 14044:2006 Environmental management – Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines.
4. University of New Hampshire - Institute for the Study of Earth, User's Guide for the DNDC Model, 2007.
5. T. Nemecek, A. Heil, O. Huguenin, S. Meier, S. Erzinger, S. Blaser, D. Dux, A. Zimmermann, Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems, Final report ecoinvent 2000 No. 15., Dübendorf, 2003.
6. P. Tidåker, Life Cycle Assessment of Grain Production Using Source-Separated Human Urine and Mineral Fertiliser, 2003.
7. U.S. Environmental Protection Agency, Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Research Triangle Park, 1995.
8. JRC, Biofuels Versus Diesel and Gasoline in the JEC-WTW report version 2c - An Extract from the 'Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context', ver. 2c March 2007, ISBN 92-79-10330, 2008.
9. http://www.ucea.it/.
10. IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Published: IGES, Japan, 2006.
11. M. Goedkoop, R. Spriensma, The Eco-Indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Prè Consultants B. V. Amersfoort, 2000.
12. F. Bonciarelli, U. Bonciarelli, Coltivazioni erbacee da pieno campo, Edagricole, Bologna, 2001.

IMPIANTI DI PRODUZIONE ENERGETICA DA OLI VEGETALI SVILUPPI TECNICI, TENDENZE PROGETTUALI E PROBLEMATICHE AUTORIZZATIVE

Strani Giancarlo[1], Luci Cristiano[1], Ragni Romina[1]

[1]BIONOISE Ingegneria Ambientale, V. Gagarin 3, CORCIANO (PG)

SOMMARIO

La produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili trova un'interessante sviluppo nell'utilizzo di impianti con motori alternativi alimentati con olio vegetale non trattato chimicamente (biomassa).

Dopo le prime esperienze realizzative di qualche anno fa, basate sull'utilizzo degli incentivi legati al rilascio dei "certificati verdi", le nuove normative permettono di configurare questi impianti come IAFR (Impianti Alimentati da Fonti Rinnovabili); tale qualifica consente al proponente, per taglie inferiori al MWe, di accedere alla tariffa omnicomprensiva mediante domanda al GSE (Gestore Servizi Elettrici). L'interessante rapporto tra investimento e tempo di ritorno dell'investimento stesso, ha determinato un forte impulso nella realizzazione di simili impianti con conseguente disponibilità sul mercato di numerosi produttori di motori ad olio vegetale, installatori di impianti e relativa capillare diffusione sul territorio. Per contro, tali iniziative, favorite da leggi nazionali e da Finanziarie del Governo (2007 e 2008) trovano forti ostacoli nelle lungaggini degli iter autorizzativi da parte degli Enti preposti. In tale lavoro si riepilogano le problematiche tecniche e procedurali incontrate nella stesura di oltre 20 progetti di impianti di diversa taglia, oltre ad una ricerca di tipo chimico e microbiologico su caratteristiche degli oli e problematiche nella loro combustione.

INTRODUZIONE

La produzione energetica da fonti rinnovabili (F.E.R.), in particolare mediante centrali azionate da motori a combustione interna alimentati da oli vegetali, ha subito negli ultimi tempi un notevole sviluppo tecnico e commerciale.

Le novità introdotte dalla Legge Finanziaria 2008 [1] e dal Decreto 99/2009 [2] distinguono la tariffa incentivante omnicomprensiva, riconosciuta all'energia prodotta con tali impianti, tra oli di provenienza comunitaria ed oli extracomunitari, superando il concetto di filiera corta e filiera lunga.

Gli strumenti normativi recentemente introdotti vanno nella direzione di semplificare gli iter autorizzativi degli impianti, in particolare per potenze elettriche inferiori al MWe; il citato decreto 99/2009 introduce ulteriori elementi di chiarezza sulla non applicabilità della V.I.A. ad impianti di potenza inferiore al MWe, sulle competenze dell'iter autorizzativo secondo D.Lgs. 387/2003 [3] e sulle procedure di riconoscimento, da parte del GSE, della qualifica di impianto alimentato da fonti rinnovabili (I.A.F.R.).

Nel presente lavoro viene presentata una panoramica delle principali soluzioni progettuali per impianti di produzione di energia alimentati ad olio vegetale con e senza cogenerazione/trigenerazione. Vengono riassunte inoltre alcune esperienze nell'iter autorizzativo a cui sono sottoposti tali impianti e le problematiche ostative ancora oggi largamente presenti nel confronto con gli Enti preposti a rilasciare pareri all'interno del procedimento unico regolato dal D.L. 387/2003.

In ultimo, viene riportata una linea di ricerca di tipo biochimico avviata in merito alle caratteristiche degli oli vegetali, in collaborazione con il Dipartimento di Biochimica della Facoltà di Agraria di Perugia.

MECCANISMI INCENTIVANTI

Le produzioni di energia elettrica utilizzanti fonti rinnovabili danno diritto al riconoscimento dei cosiddetti "certificati verdi". Si tratta di un meccanismo incentivante, definito a livello europeo (Direttiva 2001/77/CE [4]) per favorire la diffusione di sistemi di produzione energia da fonti rinnovabili, quali le biomasse, il fotovoltaico, l'eolico, l'idroelettrico, ecc. La Legge Finanziaria 2008 ha introdotto la possibilità di accedere alla tariffa "omnicomprensiva" fino a taglie di potenza maggiori rispetto al passato, differenziate per tipologia di fonte rinnovabile; per gli impianti a biomasse, la soglia di potenza è stata fissata in 1000 kWe con iniziale differenziazione tra utilizzo di oli da filiera corta ed olio da filiera extranazionale o extracomunitaria.

Il recente D.L. 99/2009 del 23/07/2009, stabilisce in maniera definitiva le tariffe incentivanti per tutte le tipologie di produzione elettrica da fonti rinnovabili, distinguendo per le biomasse una tariffa maggiore (0,28 €/kWh) per gli oli di provenienza comunitaria, ed una tariffa ridotta per gli altri oli (0,18/kWe). Tale regolamentazione, oltre che definire alcuni aspetti dell'iter autorizzativo, descritti nei paragrafi seguenti, stabilisce alcuni punti essenziali nelle scelte realizzative degli impianti a biomassa che stanno fortemente condizionando le decisioni degli operatori nel settore.

Attraverso un iter autorizzativo definito dal D. Lgs. 387/2003 e le modalità previste dalla Legge 241/90 [5], chi intraprende un'iniziativa di produzione energetica da fonti rinnovabili, ottenuta la necessaria autorizzazione unica stabilita dal decreto citato, può richiedere al GSE (Gestore Servizi Elettrici) il riconoscimento di Impianto Alimentato da Fonti Rinnovabili (I.A.F.R.), ottenendo quindi il riconoscimento di una tariffa unica in funzione dell'energia annua prodotta, comprendente sia la quota per l'energia

elettrica prodotta ed immessa in rete, sia l'incentivo statale legato alla fonte rinnovabile.

I benefici previsti per la produzione da fonti rinnovabili, hanno durata, prolungata nella finanziaria 2008, a 15 anni. Il beneficio economico riscontrabile porta ad un interessante ritorno dell'investimento; in particolare utilizzando sistemi di produzione elettrica azionati da motori a biomassa liquida (olio vegetale). Per i motivi citati, l'orientamento dei proponenti tali impianti si concentra su soluzioni di potenza elettrica inferiore al MW, optando per l'utilizzo di oli combustibile di provenienza comunitaria; questi due aspetti stanno condizionando sia le attività delle aziende costruttrici di impianti che propongono soluzioni impiantistiche standard per potenze elettriche inferiori al MW, sia le attività di commercializzazione degli oli vegetali. Nel periodo 2008 inizio 2009, tutte le filiere di approvvigionamento oli si erano orientate verso gli oli di palma, jatropha e simili di provenienza extracomunitaria in ragione del minor prezzo; la nuova tariffa, più elevata per oli di tracciabilità comunitaria, sta orientando gli operatori verso oli comunitari, quindi olio di girasole ed in maniera preponderante olio di colza.

ESPERIENZE PROGETTUALI

Tipologia impianti

Gli impianti ad olio vegetale maggiormente diffusi sono costituiti da motori diesel trasformati nel sistema di iniezione per l'alimentazione con olio vegetale; per quanto evidenziato in precedenza, gli impianti di potenza elettrica inferiore al MW vengono realizzati o con unica macchina o con due macchine da 0,5 MWe.

I motori a ciclo diesel, di tipo industriale, maggiormente impiegati in questo settore, in base alle nostre esperienze progettuali, sono CATERPILLAR a controllo elettronico, MAN, MITSUBISHI e CUMMINS.

Un impianto tipo, per la sola produzione di energia elettrica da oli vegetali, può essere riassunto nei seguenti elementi costituenti:

- gruppo generatore con singola potenza elettrica variabile da 500 a 1.000 kWe;
- cabina insonorizzata per l'alloggiamento del gruppo;
- silos per lo stoccaggio dell'olio vegetale, di capacità unitaria 30 m^3, in numero di due o quattro;
- cabina quadri elettrici e trasformatore elevatore di tensione.

La collocazione degli apparati e la tipologia delle realizzazioni può variare in funzione delle problematiche di inserimento urbanistico/ambientale; troviamo quindi insonorizzazioni più o meno spinte, serbatoi verticali, distesi o interrati, ecc.

A questi elementi base, possono poi aggiungersi dispositivi vari per l'abbattimento delle emissioni in atmosfera, sistemi di controllo dell'impianto, opere civili accessorie, ecc, funzioni della taglia delle macchine e della localizzazione dell'impianto. In Figura 1 è riportato un tipico impianto ad olio vegetale da 1 MWe con recupero termico.

In alcuni casi, la produzione di energia elettrica è abbinata all'utilizzo del calore generatore dal motore (cogenerazione); tale utilizzo può attuarsi, come riscaldamento di edifici produttivi o rete di riscaldamento residenziale, oppure come utilizzo dell'energia termica in un ciclo produttivo.

La presenza della cogenerazione, comporta un forte recupero energetico e quindi economico da aggiungere a quello della pura produzione di energia elettrica con il meccanismo della tariffa omnicomprensiva. A titolo indicativo, possiamo evidenziare come un impianto di taglia 1,0 MWe disponga di una potenza termica da recupero energia sia dall'acqua di raffreddamento motore, che dal contenuto dei fumi di combustione, pari a circa 1,3 MWt.

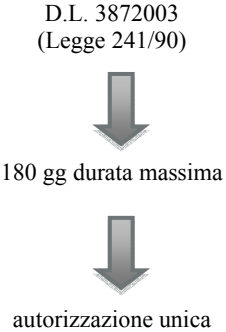
In termini di benefici ambientali, l'utilizzo di un motore a biomassa liquida, comporta una riduzione di emissioni in atmosfera di circa 4500 t/anno di CO_2, considerando il ciclo di vita complessivo delle piante oleoginose.



Figura 1: Centrale ad olio vegetale da 1 MWe

Iter autorizzativo

Gli impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili sono sottoposti ad un procedimento di autorizzazione unica secondo quanto previsto dall'art. 12 del D.Lgs. 387/2003; i tempi previsti per il procedimento e le modalità di esecuzione sono dettati dalla Legge 241/90. Il procedimento denominato "autorizzazione unica" costituisce titolo a costruire ed esercire l'impianto, anche in deroga ai vincoli urbanistici vigenti. Gli impianti alimentati da fonti rinnovabili sono considerati elementi di pubblica utilità, urgenti ed indifferibili, la cui autorizzazione costituisce variante al piano regolatore vigente.



La normativa nazionale citata demanda generalmente alla Provincia interessata dal nuovo impianto la gestione dell'iter autorizzativo; in alcune aree territoriali, emergono però le prime difformità procedurali, poiché in alcuni casi il procedimento è affidato alla Regione (es. Marche, Puglia), in alcuni casi ai singoli Comuni (es. Friuli Venezia Giulia). L'iter di presentazione del progetto di un impianto ad olio vegetale prevede la consegna degli elaborati necessari per la convocazione della conferenza di servizi alla quale partecipano gli organi preposti che esprimono il loro parere

per quanto di loro competenza (Comune, Provincia, Regione, ARPA. ENEL, ASL, VV.FF. Sovrintendenze, ecc).

Alcune Regioni e/o Province italiane hanno predisposto dettagliate linee guida per la redazione della domanda di autorizzazione, dove sono previsti tutti i passaggi autorizzativi, la documentazione necessaria e gli Enti coinvolti nel procedimento; in altre Regioni, l'iniziativa è lasciata a singole scelte locali, con ulteriore elemento di difformità.

Ottenuta la necessaria autorizzazione unica, il soggetto proponente richiede al GSE la qualifica di impianto alimentato da fonti rinnovabili, per avere accesso alla tariffa incentivante corrispondente (certificati verdi o tariffa omnicomprensiva riportata in Figura 2).

N°	FONTE	TARIFFA (€cent/kWh)
1	Eolica per impianti di taglia inferiore a 200 kW	30
3	Geotermica	20
4	Moto ondoso e maremotrice	34
5	Idraulica diversa da quella del punto precedente	22
6	Biogas e biomasse, esclusi i biocombustibili liquidi ad eccezione degli oli vegetali puri tracciabili attraverso il sistema integrato di gestione e di controllo previsto dal regolamento (CE) n. 73/2009 del Consiglio, del 19 gennaio 2009	28
8	Gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biocombustibili liquidi ad eccezione degli oli vegetali puri tracciabili attraverso il sistema integrato di gestione e di controllo previsto dal regolamento (CE) n. 73/2009 del Consiglio, del 19 gennaio 2009	18

Figura 2: Tabella tariffe omnicomprensive GSE

Statistica italiana

La diffusione sul territorio nazionale di impianti da fonti rinnovabili ha subito negli ultimi tempi un forte impulso; tralasciando le classiche realizzazioni italiane nel settore idroelettrico, da tempo presenti su varie zone d'Italia, sono emerse in maniera capillare molte realizzazioni nel campo del solare fotovoltaico e delle biomasse.

Tale impulso, favorito dagli incentivi del Conto Energia per il solare fotovoltaico e dalla tariffa omnicomprensiva per le altre forme di rinnovabili di piccola taglia, ha determinato il proliferare di numerose realizzazioni a cui si aggiungono i grandi impianti energetici collegati agli incentivi dei certificati verdi.

La situazione italiana è stata ben fotografata dal rapporto GSE al dicembre 2008 [6], articolata per distribuzione territoriale e tipologia di fonte rinnovabile; limitatamente alla tipologia di produzione da biomassa liquida, oggetto di questo lavoro, in Figura 3 si riporta il quadro riassuntivo GSE.

Per quanto riguarda la Regione Umbria, la situazione del GSE al 31 dicembre 2008 indica la presenza di 10 impianti per una potenza elettrica installata di 25,5 MW; analizzando il parametro più significativo dell'energia prodotta, gli stessi impianti umbri hanno prodotto nel 2008 105,3 GWh da biomassa e bioliquidi, pari al 3,7% della produzione da biomasse nazionale.

	2007		2008		% 08/07	
GWh	Reale	Normalizzato[1]	Reale	Normalizzato[1]	Reale	Norm.[1]
Idrica	32.815,2	42.509,3	41.623,0	42.908,6	26,8	0,9
Eolica	4.034,4	4.518,4	4.861,3	5.839,2	20,5	29,2
Solare	39,0	39,0	193,0	193,0	394,9	394,9
Geotermica	5.569,1	5.569,1	5.520,3	5.520,3	-0,9	-0,9
Biomasse e rifiuti	5.441,3	5.441,3	5.966,4	5.966,4	9,7	9,7
Solidi	3.994,0	3.994,0	4.302,3	4.302,3	7,7	7,7
– da RSU biodegradabili[2]	*1.512,5*	*1.512,5*	*1.556,2*	*1.556,2*	*2,9*	*2,9*
RSU non biodegradabili	*(1.512,5)*	*(1.512,5)*	*(1.556,2)*	*(1.556,2)*	*2,9*	*2,9*
– da biomasse solide	*2.481,5*	*2.481,5*	*2.746,1*	*2.746,1*	*10,7*	*10,7*
Biogas	1.447,3	1.447,3	1.599,5	1.599,5	10,5	10,5
– da rifiuti	*1.247,3*	*1.247,3*	*1.355,1*	1.355,1	*8,6*	*8,6*
– da fanghi	*9,0*	*9,0*	*14,8*	14,8	*64,4*	*64,4*
– da deiezioni animali	*53,3*	*53,3*	*69,8*	69,8	*31,0*	*31,0*
– da attività agricole e forestali	*137,7*	*137,7*	*159,8*	*159,8*	*16,0*	*16,0*
Bioliquidi	-	-	64,6	64,6		
– da altri bioliquidi	-	-	*59,1*	*59,1*		
– da biodiesel	-	-	*0,4*	*0,4*		
– da rifiuti liquidi biodegradabili	-	-	*5,1*	*5,1*		
Totale	47.899,0	58.077,0	58.164,0	60.427,4	21,4	4,0
Totale/CIL	13,5%	16,4%	16,5%	17,1%		

Figura 3: Statistica GSE 2008 produzione energia da biomasse

Esperienze progettuali

Gli aspetti progettuali di maggior rilievo, nel caso di impianti alimentati ad olio vegetale possono essere riassunti in pochi elementi principali:

- analisi di compatibilità con gli strumenti urbanistici vigenti, i piani territoriali ed i vincoli ambientali, paesaggistici ed archeologici;
- valutazione di impatto acustico;
- valutazione delle emissioni in atmosfera;
- analisi di possibile interessamento di suolo ed acque;
- analisi delle emissioni elettromagnetiche degli apparati di trasformazione elettrica;
- impatto delle opere in termini di viabilità, stoccaggio fluidi, intervalli di manutenzione degli impianti, produzione di rifiuti e piano di dismissione dell'impianto stesso;
- analisi del rischio incendio e sicurezza.

Nel periodo 2006-2009, sono state eseguite diverse pratiche progettuali ed autorizzative per impianti nel range di potenza 0,8÷2,8 MWe con e senza cogenerazione/trigenerazione; le attività si sono articolate su un ampio spazio territoriale che va dalla Provincia di Udine a quella di Bari con particolare concentrazione nel Lazio e nelle Marche. Nella Tabella 1 è riportata la distribuzione territoriale dei progetti eseguiti, la loro taglia di potenza ed il numero per anno; il tutto è riepilogato nel diagramma di Figura 4.

Dal diagramma di Figura 4, si evidenzia come per questa tipologia di realizzazioni da fonti rinnovabili, dopo un vivace avvio nel 2007, sia seguito un rallentamento nel 2008 con successiva forte crescita nel 2009; l'anno 2008 è stato condizionato dalle indeterminazioni legislative sul passaggio al regime incentivante della tariffa omnicomprensiva, il cui valore legato ad ipotesi di filiera corta/lunga sulla provenienza degli oli ha avuto una lungo e difficile gestazione.

Tornando agli aspetti progettuali, la recente Legge 99/2009 in materia di energia stabilisce la necessità, recepita dal GSE, di sottoporre ad autorizzazione unica il progetto definitivo dell'impianto, completo di tutti gli elementi richiesti dalle NTA comunali, in virtù del fatto che l'autorizzazione finale costituisce titolo a costruire.

Allo scopo di dare le maggiori informazioni possibili agli Enti preposti all'autorizzazione degli impianti, l'impostazione progettuale dei nostri lavori si basa sull'analisi delle componenti precedentemente indicate con particolare attenzione agli impatti rumore ed atmosfera, spesso fonte di

preoccupazione da parte degli uffici comunali, dipartimenti ARPA e sezioni ASL.

Tabella 1: Distribuzione sul territorio dei progetti eseguiti

ANNO	Località	Prov.	POTENZA [Mwe]
2006	TODI	PG	0,7
2007	RIETI	RI	0,965
2007	LATINA	LT	0,965
2007	APRILIA	LT	0,965
2007	PERUGIA	PG	2,8
2007	ANDRIA	BA	2,8
2007	GUBBIO	PG	1,4
2008	LATINA	LT	0,965
2008	POMEZIA	RM	0,965
2008	APRILIA	LT	0,965
2008	PASTENA	FR	0,965
2009	LIGNANO	UD	0,965
2009	RIETI	RI	0,965
2009	TERRACINA	LT	0,984
2009	TERRACINA	LT	0,984
2009	CIVITANOVA MARCHE	AN	0,98
2009	MONTE S. PIETRANGELI	FM	0,9
2009	APPIGNANO DEL TRONTO	AP	0,96
2009	CORRIDONIA	MC	0,7
2009	ASCOLI PICENO	AP	0,965
2009	ASCOLI PICENO	AP	0,965
2009	ASCOLI PICENO	AP	0,965
2009	FONDI	LT	0,995
2009	LENOLA	LT	0,995
2009	FONDI	LT	0,995
2009	LENOLA	LT	0,995
Potenza totale [Mwe]			28,768

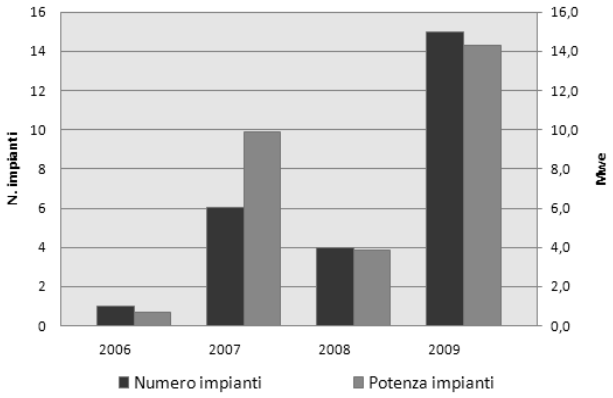


Figura 4: Andamento progetti impianti a biomassa liquida

Per fugare possibili dubbi, spesso presenti nell'approccio agli impianti ad olio vegetale da parte dei vari funzionari che rappresentano gli Enti aventi titolo ad esprimere parere in conferenza di servizi, la nostra impostazione progettuale tende ad analizzare i vari aspetti, oltre lo stretto indispensabile previsto per legge; da qui il ricorso a modelli di propagazione acustica per le relative valutazioni di impatto, modelli diffusionali di propagazione degli inquinanti in atmosfera, studi paesaggistici e di mitigazione visiva per aree con particolari vincoli.

In Figura 5 è riportato un esempio di studio di propagazione in atmosfera per impianto ad olio vegetale da 1,0 MWe complessivi, posto in area agricola.

In Figura 6 è riportato uno schema di impianto ad olio vegetale all'interno di un camping internazionale caratterizzato da forte recupero termico per le esigenze della struttura; la singolare collocazione, ha richiesto una particolare cura della mitigazione visiva.

In Figura 7 si riporta una tipica installazione di una macchina ad olio vegetale da 1,0 MWe nella pertinenza di uno stabilimento industriale.

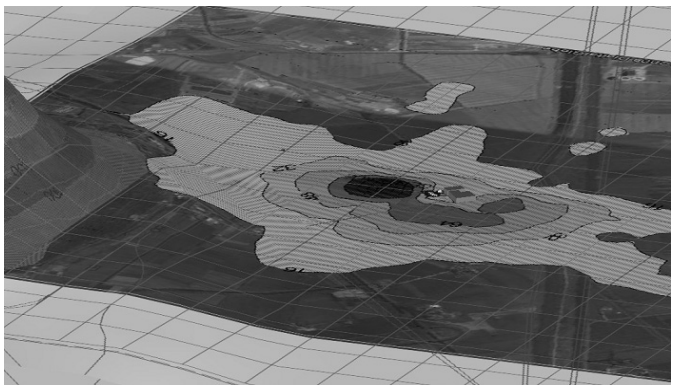


Figura 5: Valutazione propagazione NOx impianto 1MWe

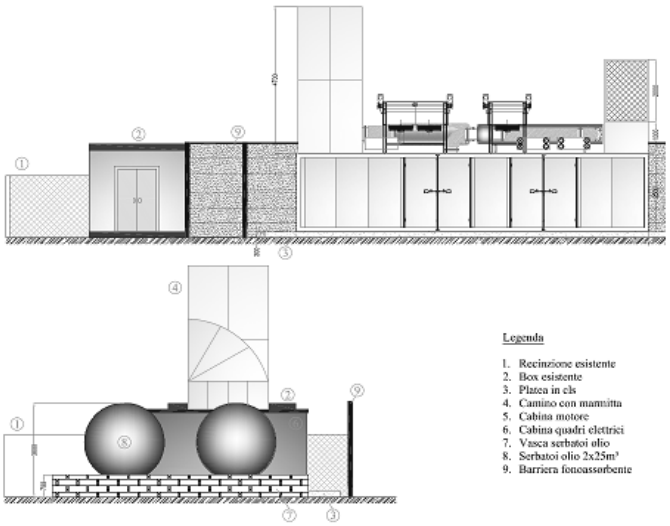


Figura 6: Valutazione impatto visivo impianto 1 MWe



Figura 7: Impianto ad olio vegetale 1 MWe in ambito industriale

PROBLEMATICHE AUTORIZZATIVE

Come detto in precedenza, l'iter di autorizzazione di un impianto alimentato da fonti rinnovabili è regolato dal D. Lgs. 387/2003, nello specifico dall'art. 12. Gli Enti preposti, generalmente le Province, sono l'organo titolare del

procedimento a cui il proponente inoltra la domanda di autorizzazione; alla presentazione del progetto in numero di copie variabili da otto a quindici, scattano i tempi del procedimento stesso regolati dalla Legge 241/90. La Provincia, istruita la pratica e verificata la completezza della documentazione progettuale, convoca la conferenza di servizi, invitando tutti gli Enti preposti al rilascio di pareri autorizzativi.

Nella riunione della conferenza di servizi, gli Enti convocati rilasciano il parere per quanto di loro competenza o inviano un parere a mezzo lettera/fax evitando la partecipazione; nella riunione, vengono richiesti alla società proponente eventuali chiarimenti e/o integrazioni documentali o progettuali che portano nella seconda conferenza di servizi alla decisione finale autorizzatoria o meno.

Normalmente i pareri di competenza si riepilogano in:

- Comune: parere compatibilità urbanistica;
- Provincia: parere emissioni in atmosfera;
- Regione: parere vincoli paesaggistici;
- ARPA regionale: parere emissioni rumore e CEM;
- ASL: parere sanitario;
- ENEL: possibilità di allaccio alla rete in MT;
- VV.FF.: regolarità pratica antincendio;
- Agenzia Dogane: prescrizioni fiscali su stoccaggi.

Da quanto premesso nei paragrafi precedenti e quanto appena riepilogato, un progetto di impianto a biomassa liquida di potenza elettrica inferiore al MWe, correttamente impostato, dovrebbe avere un iter di autorizzazione abbastanza lineare e scontato, anche alla luce del fatto che i procedimento secondo art.12 del D.Lgs. 387/2003 è definito "iter semplificato".

Purtroppo, questo auspicio cade nel vuoto per una serie di fattori di difficile comprensione ai più e di difficile gestione sia da parte del tecnico progettista che della società proponente l'impianto. Normalmente, alla luce degli incentivi attuali e delle varie normative vigenti a sostegno degli impianti di produzione da energie rinnovabili, la sola preoccupazione del proponente dovrebbe essere verso l'ammontare dell'investimento e verso l'organizzazione imprenditoria dell'iniziativa.

L'esperienza degli ultimi quattro anni conferma invece che il maggior cruccio delle società è superare il calvario dell'iter autorizzativo; il termine calvario non è a sproposito, poiché le esperienze condotte su 26 impianti, pur con approvazione di tutti quelli già sottoposti al procedimento autorizzativo, lascia perlomeno sconcertati.

Proviamo nel seguito ad elencare alcuni elementi, non tecnici, che emergono nelle conferenze di servizi all'interno del procedimento dettato dalla 387/2003, tralasciando le fasi precedenti caratterizzate da orientamenti politici locali a favore o meno di taluni impianti, comitati di cittadini ed altri fattori simili che esulano dal contenuto del presente lavoro.

La conferenza di servizi, dove si illustrano i contenuti dell'iniziativa produttiva allo scopo di acquisire i necessari pareri, è generalmente condizionata dalla diffusa non conoscenza di cosa sia il procedimento unico secondo art. 12 del D.Lgs. 387/2003 e che la Legge 241/90 ne regola tempi e modi. È altresì diffusa la non conoscenza del fatto che ogni Ente deve esprimersi per quanto di propria competenza; ciò porta a situazioni dove la locale ASL si esprime sulla distanza minima dell'impianto dalla sede di una strada regionale, il Comune di competenza si preoccupa di non meglio identificati minacce alla salute pubblica, diversi uffici dello stesso Ente danno pareri diversi (dimenticando che ogni Ente deve esprimere un solo rappresentante in conferenza di servizi), fino alla grottesca situazione di accese liti tra i diversi funzionari dello stesso Ente in conferenza di servizi.

Riguardo ai tempi del procedimento, fissati in una durata massima di 180 giorni dalla presentazione della domanda, molti fattori concorrono al loro sistematico sforamento; proviamo ad elencarne alcuni:

- ritardo nell'istruire la pratica da parte del titolare del procedimento;
- errore di trasmissione delle copie del progetto agli Enti preposti (indirizzo o competenza);
- dimenticanza nel convocare alcuni Enti che devono esprimere parere vincolante;
- mancata presentazione dei rappresentanti degli Enti alla conferenza di servizi, senza inviare comunicazione alcuna;
- attesa di pareri da parte di Enti che non hanno competenza alcuna in quel determinato procedimento.

Risulta evidente che spesso anche l'imprenditore più caparbio si arrenda di fronte a situazioni in conferenza di servizi che ricordano il classico filone della commedia all'italiana anni '60, piuttosto che un minimo di efficienza dell'apparato statale.

Per quanto rappresentato, la scelta progettuale nell'affrontare tali adempimenti, è quella di coordinare con il cliente la corretta collocazione di un potenziale impianto, concordare a priori con le singole amministrazioni alcune scelte impiantistiche e presentare un progetto ben articolato con ridondanza di valutazioni tecniche ben oltre il minimo necessario.

SVILUPPI TECNOLOGICI

Nel nostro lavoro del 2008 (vedi atti CIRIAF 2008) avevamo illustrato le tecniche di abbattimento degli ossidi di azoto (NOx) costituenti l'emissione più significativa nella combustione di oli vegetali non trattati nei motori diesel; oggi le numerose esperienze applicative nel settore hanno introdotto significativi miglioramenti nel panorama dei motori ad olio vegetale. Proviamo a darne un breve riepilogo nel seguito. Dal punto di vista motoristico, si riscontra una larga diffusione di tipologie di motori funzionanti ad olio vegetale. Quasi tutti i marchi storici dei gruppi elettrogeni e della cogenerazione dispongono di motori azionabili con olio vegetale, pur con limitate esperienze operative; altro aspetto significativo è rappresentato dall'utilizzo di motori a controllo elettronico, tipo i CATERPILLAR serie 35, la cui possibilità di regolazione dei parametri di combustione facilità il compito del conduttore l'impianto in termini di ridotte emissioni di NOx ed alti valori di rendimento.

Laddove necessario, per locali prescrizioni sui valori della concentrazione degli NOx autorizzata, si può dotare l'impianto ad olio vegetale di efficaci sistemi di abbattimento di tipo SCR; il processo SCR (Selective Catalytic Reaction), consiste nell'iniettare ammoniaca (o urea) in un reattore, munito di catalizzatore, a valle del motore, che permette la trasformazione degli NOx in azoto e ossigeno molecolari.

Altro sistema di riduzione degli NOx è costituito dalla ricircolazione dei gas esausti EGR (Exhaust Gas Recirculation), che diminuisce la temperatura massima di combustione, diminuendo la formazione degli ossidi di azoto a scapito di una piccola riduzione del rendimento motore. Il sistema EGR, oggi utilizzato dalle maggiori case motoristiche mondiali, consiste in una valvola di ricircolo di parte dei gas di scarico nell'aspirazione del motore; il conseguente abbassamento delle temperature di combustione permette di

ridurre notevolmente le concentrazioni di NOx dei gas di scarico. Gli sviluppi tecnologici dei sistemi EGR abbinano al sistema un controllo elettronico sulle emissioni che permette di variare in continuo ed ottimizzare la quantità di gas ricircolati e quindi mantenere in limiti prestabiliti l'emissione di NOx.

Nel sistema definito "Low Pressure" la percentuale di gas ricircolati in camera di combustione varia tra il 10÷15%; questa condizione permette di ottimizzare l'abbattimento di NOx senza penalizzare il rendimento motore. In Figura 8 è riportato lo schema applicativo del sistema EGR ad un motore a combustione interna; nel diagramma si riporta l'andamento della riduzione di NOx in funzione della percentuale di ricircolazione gas di scarico.

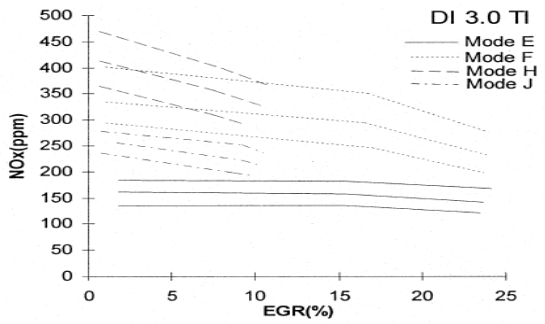


Figura 8: Riduzione NOx in funzione della percentuale di ricircolo

CARATTERISTICHE OLI VEGETALI

Nello studio delle caratteristiche di comportamento dei motori a combustione interna alimentati con oli vegetali sono stati affrontati vari aspetti, tuttora oggetto di indagine.

Le principali problematiche emerse nelle prime realizzazioni di motori ad olio vegetale sono da riscontrarsi sui parametri di acidità e fluidità dell'olio, quindi nelle sue problematiche di aggressione agli organi meccanici del motore e nella gestione del mantenimento degli oli alla corretta temperatura di funzionamento. Le prime realizzazioni, fino a tutto il 2008, erano basate sull'impiego di olio di palma; su tale prodotto sono state eseguite varie indagini, sia come parametri fisico-chimici legati alla capacità di combustione, sia alle problematiche di durata della meccanica per le caratteristiche intrinseche degli oli. Grazie alla collaborazione con un importatore primario di olio di palma da paesi asiatici, è stato possibile reperire campioni di olio e semi di palma su cui è stata avviata una serie di indagini biochimiche in collaborazione con il Prof. Gianluigi Cardinali del Dipartimento di Biologia Applicata della Facoltà di Agraria di Perugia.

Le prime risultanze delle analisi condotte evidenziano alcuni interessanti aspetti di notevole impatto sulla tecnologia degli impianti di alimentazione dell'olio vegetale ai motori. Sottoponendo ad esami di laboratorio campioni di olio di palma raffinato, tipo RDB, si rileva un elevato grado di purezza con residuo inferiore allo 0,1% ed acidità estremamente contenuta. Emerge inoltre una tendenza alla divisione dell'olio in due fasi: nel range di temperatura di 30÷40°C, tipico dei serbatoi di stoccaggio dell'olio, si osserva una differenziazione in due fasi in misura del 50-50%; una fase solida ed una fase stabilmente liquida già a 25-30°C.
I primi risultati delle varie indagini chimiche e biochimiche tenderebbero ad imputare questo fatto all'elevato contenuto nella parte solida di catene molecolari del carbonio particolarmente lunghe. Altro aspetto osservato è la presenza di un fenomeno simile alla sovra-fusione con differente punto di passaggio liquido-solido tra riscaldamento e raffreddamento dell'olio. Questi due aspetti, come è facile immaginare, spiegano alcune problematiche incontrate presso alcuni impianti in esercizio ed aprono la strada ad interessanti punti di approfondimento nell'ottica di indirizzare i costruttori di impianti verso soluzioni tecnologiche tali da superare le problematiche descritte.

Oggi, gli orientamenti dei costruttori vanno verso l'utilizzo di oli di colza di provenienza comunitaria in virtù della maggior tariffa omnicomprensiva riconosciuta dal GSE a tali prodotti; l'olio di colza, per le sue caratteristiche fisico-chimiche e la sua fluidità, risulta ottimale nell'utilizzo in motori a combustione interna, eliminando gran parte dei problemi gestionali legati all'olio di palma molto più denso con punto di solidificazione a circa 20°C. Restano comunque presenti sul mercato numerosi impianti alimentati ad olio di palma, i cui vantaggi economici, a fronte di una forte diminuzione del prezzo di tale olio, restano immutati; da qui l'attualità e l'importanza delle ricerche avviate.

CONCLUSIONI

I concetti riportati nei paragrafi precedenti evidenziano come la tecnica della produzione di energia elettrica da biomassa liquida sia ancora allo stadio iniziale, pur trattandosi di tecnologia teoricamente ben conosciuta.

Le problematiche autorizzative sono la vera spina nel fianco di chi si accinge ad iniziative imprenditoriali in tali settori; la spinta governativa dettata dalle normative comunitarie si scontra a livello locale con ignoranza delle procedure, assoluta non conoscenza delle problematiche di tali impianti, spesso recepiti come "mostri" ecologici anziché impianti da energia rinnovabile come tali sono. Su tale fronte è auspicabile l'emanazione in tempi brevi delle "Linee guida nazionali sull'iter autorizzativo degli impianti da fonti rinnovabili", sperando che alla data di pubblicazione del presente lavoro possa essere già operativo. Tali linee guida eliminerebbero le forti diversità presenti sul territorio nazionale, sia come competenze delle varie amministrazioni locali nell'iter autorizzativo, sia nelle modalità e contenuti del progetto degli impianti.

Sul fronte tecnologico, come brevemente descritto, ci sono importanti margini di sviluppo degli impianti a biomassa liquida, sia come scelte motoristiche che come impianti del circuito olio vegetale; ciò permetterà di poter realizzare soluzioni di produzione energia diffusa capillarmente sul territorio, esente da problematiche di impatto ambientale, soprattutto in termini di emissioni in atmosfera.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Legge n.244 del 24 dicembre 2007.
2. Legge n.99 del 23 luglio 2009.
3. Decreto Legislativo n. 387 del 29 dicembre 2003.
4. Direttiva 2001/77/CE del 27 ottobre 2001.
5. Legge 241 del 7 agosto 1990.
6. "Statistiche sulle fonti rinnovabili in Italia" – Rapporto 2008 – GSE (Gestore Servizi Elettrici).

ASSORBENTI SOLIDI E SEMISOLIDI IN IMPIANTI TERMICI ELIOASSISTITI

G.Galli[1], A.de Lieto Vollaro[1], R.de Lieto Vollaro[2], E.deLieto Vollaro[3]

[1] Dipartimento di Fisica Tecnica, Università La Sapienza - Via Eudossiana 18, 00184 Roma
[2] Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Industriale, Università di Roma Tre - Via della Vasca Navale 79, 00100 Roma
[3] Cofely Servizi S.p.A. - Via Marina dei Gigli 37, 80146 Napoli

SOMMARIO

Alcuni assorbenti solidi e semisolidi (gelatine) offrono caratteristiche termofisiche interessanti per essere utilizzati in macchine ad assorbimento che prelevano l'energia termica di rigenerazione da impianti solari. A tale riguardo vengono esaminate alcune soluzioni per consentire la produzione di acque temperate fredde (o calde) da inviare, in estate (o in inverno), in un impianto a fan-coils. In questi casi risultano importanti i vantaggi delle basse temperature di rigenerazione e l'assenza di rettifica. Il funzionamento discontinuo della macchina non sembra un ostacolo al corretto funzionamento del sistema perchè l'energia solare presenta una certa discontinuità che impone comunque l'installazione di un idoneo volume di accumulo.

INTRODUZIONE

L'utilizzazione dell'energia solare tramite i pannelli termici è storia soprattutto degli ultimi 20 anni anche se le prime esperienze risalgono alla metà del XVIII secolo.

A partire dagli anni '70, a seguito della crisi nei Paesi Arabi con conseguenti problemi energetici per i Paesi Europei, si riprese a costruire pannelli solari piani e a concentrazione. In quegli anni si cercò soprattutto di trovare la soluzione per risparmiare energia inserendo i pannelli nel contesto dell'impiantistica convenzionale di allora. Successivamente, quando il petrolio ed i suoi derivati tornarono disponibili ad un prezzo accettabile, i pannelli solari furono in larga misura abbandonati perché erano emersi gli aspetti negativi legati alla bassa exergia dell'acqua in uscita dai pannelli (piani), il costo elevato della manutenzione del sistema e gli aspetti estetici spesso discutibili sui tetti delle case.

Oggi il problema non è solo quello di risparmiare energia, ma soprattutto quello di ridurre l'inquinamento e le emissioni di CO_2 e i pannelli termici hanno trovato un nuovo impulso legato ad una tecnologia più sofisticata e a un'impiantistica innovativa.

In questo lavoro ci si è soffermati sulla possibilità di integrare pannelli solari di nuova generazione con macchine ad assorbimento. In particolare è stata studiata la possibilità di utilizzare come assorbenti soprattutto solidi idrati e gelatine. Queste sostanze presentano, infatti, alle nostre latitudini la compatibilità di lavoro con i pannelli

solari in tutte le stagioni. A tale riguardo è stata condotta dapprima un'indagine teorica sulle sostanze assorbenti più adatte e successivamente, individuate le coppie più interessante sono stati proposti degli schemi funzionali per diverse applicazioni impiantistiche.

1. INDAGINE SULLE COPPIE REFRIGERANTE-ASSORBENTE.

Molti assorbenti solidi presentano caratteristiche interessanti per le applicazioni solari [2], [3], [4] e [5]; in particolare Stanish e Perlmutter hanno proposto alcuni sali idrati come assorbenti con acqua o ammoniaca come refrigerante, con le seguenti reazioni di equilibrio.

$CaCl_2 \cdot H_20 + H_20 = CaCl_2 \cdot 2H_20 + 2550$ kJ/kg a)

$K_2CO_3 + 2H_20\ K_2CO_3 \cdot 2H_20 + 3470$ kJ/kg b)

$MgCR_2 \cdot 4H_20 + 2H_20 = MgCR_2 6H_20 + 3180$ kJ/kg c)

A queste reazioni vanno collegate le equazioni di Antoine:

$\log P = 10.53 - 2460/T$

$\log P = 12.20 - 3040/T$ (1)

$\log P = 11.8 - 2903/T$

E' interessante notare che la regola delle fasi in questo caso indica un solo grado di libertà [3], e pertanto i punti di funzionamento della macchina in un piano P,T, si trovano su una semiretta; in tal caso si può scegliere arbitrariamente un solo valore fra T_g e T_c e un valore fra T_a e T_e.

E', inoltre, opportuno evidenziare la notevole velocità di reazione e il basso valore di T_{gmin} che rende interessante la possibilità di applicazione in collegamento ai pannelli solari. Tale valore non è condizionato dalla T_e e quindi si possono ipotizzare anche valori molto bassi e adatti alla surgelazione

alimentare, con le ovvie correzioni da apportare nel caso di utilizzo dell'acqua come fluido refrigerante.

Si deve, comunque, osservare che tali macchine possono avere certe rigidità di funzionamento: ad esempio in una macchina frigorifera la temperatura dell'ambiente esterno fissa la $T_{condmin}$ e quindi la T_{gmin} ed anche la T_{adsmin} e quindi la T_{emin}, mentre in macchine che usano sostanze con 2° di libertà, come nelle macchine ad assorbente solido (gel di silice), anche se $T_{condmin}$ e T_{adsmin} sono fissate, si può abbassare T_e alzando T_g.

L'impiego di assorbenti solidi impone un funzionamento discontinuo della macchina che, però, ben si addice alle caratteristiche dell'energia solare. Nel caso si volesse procedere alla realizzazione di una macchina a funzionamento continuo, questo è possibile aggiungendo un assorbitore e un rigeneratore da far funzionare in opposizione di fase a quelli base della macchina. In tal caso è necessario prevedere delle valvole servocomandate per pilotare il fluido nelle varie fasi.

Nelle tab (1 e 2) sono riportate le temperature di funzionamento dei vari organi della macchina.

Tabella 1

Tabella 1						
Refrigerante	Reazione	T_{amax}(°C)		T_{gmin}(°C)		
		T_e=-10°C	T_e=4°C	T_e=25°C	T_e=35°C	T_e=45°C
H_2O	a	/	52	79	92	104
H_2O	b	/	54	75	84	94
H_2O	C	/	56	78	88	98

Tabella 2

Tabella 2						
Refrigerante	Reazione	P_e(KP_a)		P_c(KP_a)		
		T_e=-10°C	T_e=4°C	T_e=25°C	T_e=35°C	T_e=45°C
H_2O	a	/	1	3,47	5,62	9,55
H_2O	b	/	1	3,47	5,62	9,55
H_2O	C	/	1	3,47	5,62	9,55

Certamente questi sali idrati possono essere impiegati associati a un impianto a pannelli solari termici, ma, uno degli scopi del lavoro era quello di investigare per individuare le sostanze che potessero meglio funzionare nelle condizioni di media/bassa temperatura. In tale contesto si è cercato di trovare altre sostanze adsorbenti che, ancor meglio dei sali idrati, potessero lavorare con T_{gmin} particolarmente basse. In questa ricerca è apparso interessante approfondire il comportamento di una gelatina, già utilizzata per processi di trattamento dell'aria in ambienti industriali, basati appunto sulle sue capacità adsorbenti, che riducono il quantitativo di umidità specifica presente. Questa sostanza viene chiamata "gel di silice" e ha appunto il pregio di richiedere per il funzionamento del generatore, temperature inferiori a 90°C e, quindi, compatibili con l'impiego di pannelli solari. Il comportamento di questa sostanza è assai simile a quello dei liquidi normalmente usati come assorbitori (es. LiBr) e una stima fatta dei costi di realizzazione di una macchina con questa sostanza è di circa 500,00 Euro/kW, valore abbastanza basso e quindi interessante in prospettiva futura. L'inconveniente è quello di dover far ricorso a una macchina discontinua che, però, si accorda con la discontinuità del funzionamento dei pannelli solari [7].

2. ANALISI DEL COMPORTAMENTO TERMICO DI UNA MACCHINA AD ADSORBIMENTO CON GEL DI SILICE.

Le caratteristiche del gel di silice consentono di ipotizzare diverse possibilità di impiego di questa sostanza come assorbente associato all'attività dei pannelli solari. In questo caso, a differenza dei sali idrati, si ritorna, come per gli assorbenti liquidi (LiBr), a una varianza pari a due. Per studiare le applicazioni di questa sostanza si è pertanto provveduto a costruire le curve PTx tramite l'espressione di Antoine:

$$\ln\frac{P}{P_0(c)} = \frac{h_{ads}}{R_w}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) \qquad (2)$$

dove h_{ads} è il calore di adsorbimento del vapor d'acqua nel gel, R_w = 461 J/Kg, T_0 è una temperatura di riferimento, c è il contenuto d'acqua nel gel in kg/kg e $P_0(c)$ è la pressione del vapor d'acqua in equilibrio con l'adsorbente a vari *c* ed alla temperatura T_0.

Sul diagramma sono stati indicati i punti di funzionamento per diversi tipi di applicazioni:

1. macchina frigorifere;
2. pompa di calore;
3. trasformatore di calore.

Macchina frigorifera.

In fig (1a) sono riportati i punti caratteristici di un funzionamento compatibile con il supporto termico dei pannelli solari di nuova generazione. Poiché la temperatura di rigenerazione dipende dalla temperatura dell'aria esterna alla quale avviene lo scambio termico con condensatore ed assorbitore, sono state fatte due ipotesi come mostrato nello schema a blocchi di fig (1b).

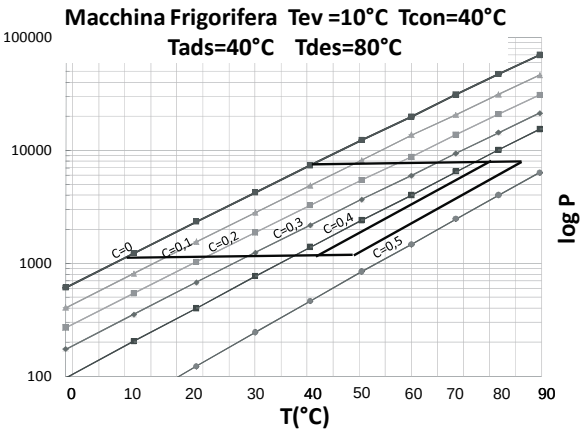


Fig (1a) Diagramma PTX (macchina frigorifera)

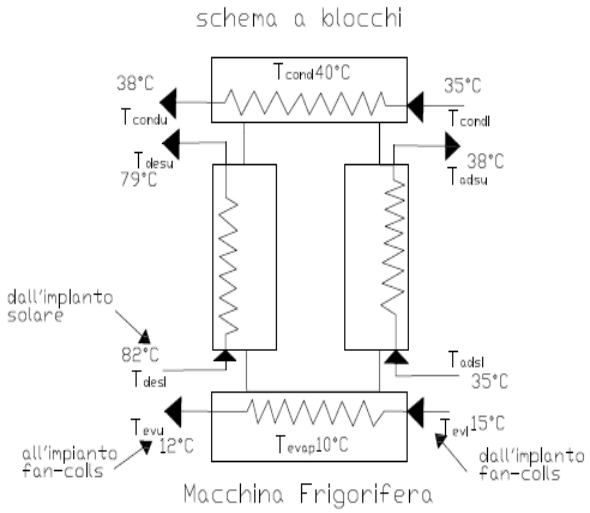


Fig (1b) schema a blocchi macchina frigorifera

Il primo caso fa riferimento a una temperatura dell'aria esterna di 35°C, in modo da poter condensare e adsorbire a 40°C. In tal caso è possibile produrre acqua fredda a 12 °C per un impianto a fan-coil con un ritorno a 15°C. L'accumulo di acqua calda prodotta dall'impianto solare è a circa 82°C per consentire la rigenerazione dell'assorbente a 77°C. Tale valore appare compatibile con il soleggiamento alle nostre latitudini e con l'impiego di un impianto misto a pannelli solari piani e pannelli solari a concentrazione a bassa temperatura.

Qualora l'aria esterna fosse disponibile a 40°C, per mantenere la temperatura dell'acqua fredda a 12°C bisognerebbe accumulare a circa 92°C dall'impianto solare. Poiché, però, questa temperatura di accumulo potrebbe presentare dei problemi perché troppo elevata, si potrebbe aumentare la temperatura di evaporazione a 15°C con conseguente produzione di acqua fredda per i fan–coil a 17°C, valore ancora compatibile con un buono scambio termico con l'aria interna. In questo caso basterebbe ancora accumulare acqua calda dall'impianto solare a circa 82°C. Un'altra soluzione sarebbe quella di ricorrere al raffreddamento del condensatore e dell'assorbitore con acqua di torre.

Pompa di calore.

In fig (2a) sono riportati i punti caratteristici di un funzionamento compatibile con il supporto termico dei pannelli solari di nuova generazione nel caso di utilizzo a pompa di calore.

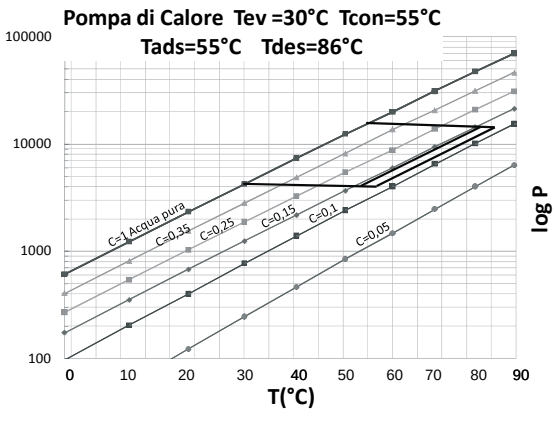


Fig (2a) Diagramma PTX (pompa di calore)

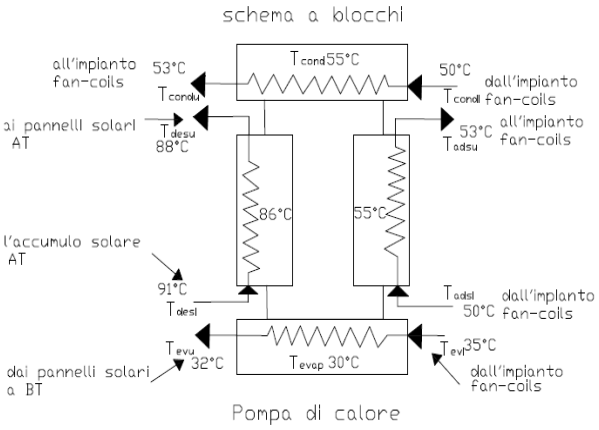


Fig (2b) schema a blocchi pompa di calore

In questo caso, come mostrato nello schema a blocchi di fig(2b), la funzione dei pannelli solari è duplice: preriscaldare l'evaporatore portandolo a 30°C con un accumulo a 35°C, sfruttando il lavoro dei pannelli piani che possono utilizzare anche l'energia diffusa e rigenerare l'assorbente a 86°C con un secondo accumulo a 91°C, con calore prodotto dai pannelli a concentrazione, eventualmente integrati con altri sistemi termici ausiliari. In tal modo si otterrebbe acqua a 53°C da inviare all'impianto a fan-coil, sia dall'assorbitore sia dal condensatore che lavorerebbero a 55°C. E' interessante notare che con un accumulo a 40°C (difficile da ottenere in inverno) e con un evaporatore preriscaldato a 35°C, la pompa di calore sarebbe in grado di fornire le stesse prestazioni termiche con una temperatura di rigenerazione di 78°C e, quindi, con un accumulo caldo a 83°C, sicuramente più facile da ottenere.

Trasformatore di calore

In fig (3a) sono riportati i punti caratteristici di funzionamento per un trasformatore di calore che utilizzi il gel di silice, compatibile con il supporto termico dei pannelli solari di nuova generazione. Questo tipo di macchina offre degli interessanti vantaggi proprio nelle applicazioni solari. Infatti in inverno capita di poter accumulare solo a temperature non adatte per servire un impianto di riscaldamento a fan-coil e quindi l'unica utilizzazione possibile risulta quella sanitaria che appare molto limitata. In questi casi è interessante il ricorso ai trasformatori di calore, quando gli assorbenti (è il caso del gel di silice), possono adeguarsi alle basse temperature di accumulo.

Nella fig(3b) è stata fatta un'ipotesi di lavoro che si avvicina a situazioni ricorrenti in inverno in Italia.

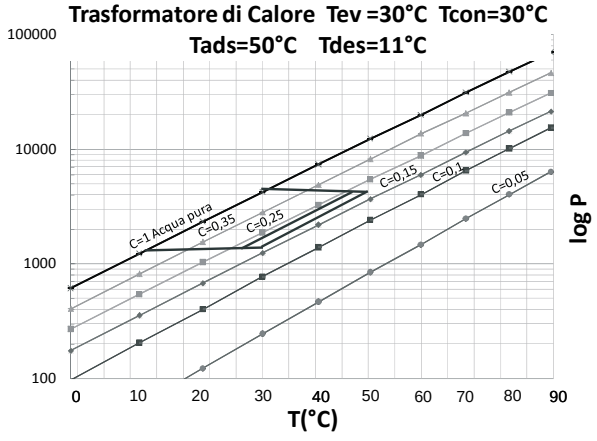


Fig (3a) Diagramma PTX (trasformatore di calore)

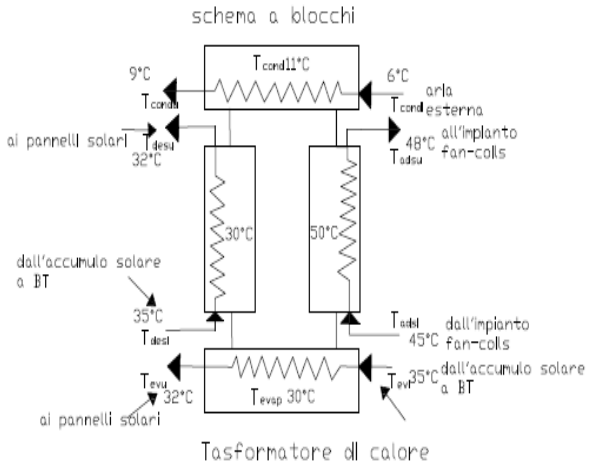


Fig (3b) schema a blocchi trasformatore di calore

Si è ipotizzato di avere aria esterna a 6°C per poter consentire una condensazione a 11°C . Se l'impianto solare riesce ad accumulare acqua calda a 35 °C, così da permettere l'evaporazione e la rigenerazione a 30°C, si può disporre di acqua a 45°C per un impianto a fan-coil, proveniente dall'assorbitore che lavora a 50°C (naturalmente con un effetto utile minore di 0,5). Questa macchina, lavorando con il gel di silice in questo campo di temperature, consente di nobilitare l'energia ottenibile dall'impianto solare e aumentandone l'exergia, ne rende possibile un più largo impiego; tale innalzamento di temperatura diventa più consistente al diminuire della temperatura ambiente esterna, quindi potrebbe essere necessario alternare i cicli di adsorbimento e rigenerazione tra il giorno e la notte, o con periodi più lunghi, come già proposto per una macchina frigorifera [7].

3. CONCLUSIONI

Le macchine ad assorbimento hanno caratteristiche che spesso si integrano molto bene con lo sfruttamento dell'energia solare mediante pannelli termici. La difficoltà che generalmente si incontra sta nell'elevata temperature necessaria per la rigenerazione. E' pertanto necessario individuare sostanze alternative a quelle che costituiscono le coppie convenzionali di questo settore (LiBr-H_2O, H_2O-NH_3 etc) che possano presentare valori più bassi della $T_{g\ min}$. A tale riguardo è parso interessante esaminare il comportamento teorico di alcuni sali idrati, già suggeriti in letteratura e soprattutto di una sostanza semisolida chiamata "gel di silice" sostanza molto utilizzate, per la sua attitudine ad adsorbire il vapor acqueo, nella deumidificazione industriale. I risultati teorici associati a situazioni ragionevolmente verificabili nelle nostre situazioni climatiche, hanno dimostrato che ci sono le condizioni per proseguire lo studio ed affrontare la fase sperimentale che appare promettente.

4. SIMBOLOGIA

T_g Temperatura di rigenerazione.
T_{gmin} Temperatura di rigenerazione minima
T_{ads} Temperatura di assorbimento
T_{cond} Temperatura dell'aria nel condensatore
T_{conde} Temp. dell'acqua entrante nel condensatore
T_{condu} Temp. dell'acqua uscente dal condensatore
T_{evap} Temperatura dell'aria nell'evaporatore
T_{eve} Temp. dell'acqua entrante nell'evaporatore
T_{cvu} Temp. dell'acqua uscente dall'evaporatore
T_{desu} Temp. dell'acqua uscente dal rigeneratore.

5. BIBLIOGRAFIA

1. U.EICKER: "Solar technologies for buildings" ed. Wiley, 2003.
2. M.A. STANISH, D.D. PERMUTTER: "Salt Hydrayìtes as Absorbents in Heat Pump Cycles", Solar Energy, 26, 1981, pp. 333-339.
3. W.E. WNTWORTH, D.W. JOHNSTON, W.W. RALDOW: "Chemical Heat Pumps Using a Dispersion of a metal Salt Ammoniate in a Inert Solvent", Solar Energy, 26, 1981, pp. 141-145
4. T.L. PRYOR, D.J. CLOSE: "Measurements of the behavior of adsorbent energy storage beds", Solar Energy, 20, 1978, pp. 151-155.
5. Z. KROLICKY, B. ZAJACZKOWSKI, T. WILK: "Selected aspects of thermodynamic modeling of solar assisted chemical ice maker with ammonia and chloride salt", 61st ATI Congress Intern. Session, Perugia 2006.
6. M. FELLI, G.GALLI: "The Degree of Freedom of Absorption System", (XVI International Congress of Refrigeration, Paris 1983, Commission B1
7. G. SANTORI, S. VASTA, G. MAGGIO, A. FRENI, F. POLONARA, G. RESTUCCIA: "Modelling and design o fan adsportive solari ce maker", 61st ATI Congress Intern. Session, Perugia 2006.
8. H.I. NDREWS : "The Development of a Solid Absorption Regriferating Machine for Use on Trains", Modern Refrigeration, September 1955, p. 330
9. E. BONAUGURI: "Macchine frigorifere ad assorbimento a secco con ammoniacati di $CaCl_2$", XV Congresso Nazionale ATI, Napoli 1960
10. W.M. RALDOW, D.W. JOHNSTON, W.E. WENTWORTH: "Utilization of Suspension in a Nonvolatile Inert Solvent to Study Solid-Gas Equlibria. An Investigation of the $SrCl_2$ – NH_3 System", J. of Physical Chemistry, 84, 1980, pp 2599-2601
11. E.W.WASHBURN (Editor in Chief), International Critical Tables, Vol. VII, Mc Graw Hill, New York, 1926
12. D.M. GRUEN, M.H. MENDELSOHN, I. SHEFT: "Metal Hydrides as Chemical Heat Pumps", Solar Energy, 21, 1978, pp. 153-156
13. W.H. HARTWIG, A.W. WOLTMAN, J.P.MASSON: "Design Theory and Performance of Cryogenic Molecular Adsorption Refrigeration Systems", VII ICEC Congress, London 1978
14. R.M. LAZZARIN "Experimental report on the reliability of ammonia-water absorpion chiller", International Journal of Refrigeration 19, n. 4, 247, 1996

STUDIO DI FATTIBILITA' DI CAMINI SOLARI NELL'EDILIZIA RESIDENZIALE

M. Coppi[1], F. Salata[1], A. Quintino[1]

[1] Dipartimento di Fisica Tecnica, Università "La Sapienza" - Via Eudossiana 18, 00184 Roma

SOMMARIO

Nella prospettiva della realizzazione di edifici energeticamente efficienti, appare importante lo studio di sistemi di raffrescamento a ventilazione naturale di ambienti residenziali che possano sfruttare calore di origine solare. Una corretta esposizione dell'edificio già consente di sfruttare la ventilazione passiva tra gli ambienti. Strategie di natura differente possono però garantire una ventilazione naturale senza il vincolo dell'esposizione. Tra i vari sistemi idonei a tale scopo, il presente lavoro effettua uno studio di fattibilità di un camino solare da utilizzare per la ventilazione naturale estiva degli ambienti abitativi. Viene affrontato, in geometria bidimensionale, lo studio del regime termo-fluidodinamico che si instaura all'interno di un camino solare di dimensioni comparabili con gli involucri edilizi residenziali. Il sistema è costituito da un camino posto al centro dell'edificio su cui si affacciano le griglie di ventilazione dei vari ambienti. Il calore viene fornito alla base del camino mediante il riscaldamento di una piastra orizzontale da parte di un sistema di accumulo ad acqua che si "carica" durante il periodo diurno attraverso pannelli solari termici a convezione naturale. Utilizzando un modello CFD (Computational Fluid Dynamics) vengono simulate diverse condizioni operative, variando le dimensioni del camino allo scopo di calcolare le portate e le velocità dell'aria che si instaurano nelle diverse configurazioni.

1. PREMESSA.

Il crescente bisogno di energia, unito agli evidenti problemi ambientali legati allo sfruttamento delle risorse energetiche di tipo tradizionale, impone alla ricerca di approfondire nuovi metodi per lo sfruttamento delle risorse rinnovabili e "pulite", attualmente disponibili. Tale esigenza è particolarmente pressante nel campo dell'edilizia, considerato che i relativi fabbisogni energetici rappresentano la voce più significativa dell'intera "bolletta" energetica nazionale. D'altronde la stessa Comunità Europea, con la Direttiva 2002/91/CE sull'efficienza energetica degli edifici, Energy Performance of Building (EPBD), ha tracciato il percorso da seguire per una drastica riduzione dei consumi energetici nell'edilizia. Il Consiglio Europeo nel Novembre 2009 ha stabilito, per gli edifici pubblici, "elevatissimi standard energetici" che dovranno essere operativi dopo il 31/12/2018.

Per gli edifici residenziali e gli uffici di nuova costruzione, tali standard dovranno essere rispettati a partire dal 2021.

Nella prospettiva della realizzazione di edifici energeticamente efficienti, appare importante lo studio di sistemi di raffrescamento a ventilazione naturale di ambienti residenziali che possano sfruttare calore di origine solare. Tali sistemi, pur non potendo avere la pretesa di rappresentare

un'alternativa ai sistemi di raffrescamento tradizionali, possono comunque costituire un valido contributo almeno al contenimento del costo energetico globale dell'edificio.

La presente nota descrive uno studio di fattibilità di camini solari da impiegarsi nell'edilizia residenziale in zone a bassa densità abitativa dove l'altezza degli edifici si sviluppa su due-tre piani fuoriterra. Viene affrontato il problema della ventilazione naturale estiva durante il periodo notturno, di ambienti abitativi, sfruttando il calore accumulato durante i periodo diurno. Lo studio, pur riferendosi ad un caso specifico (attualmente in fase di realizzazione), affronta il problema da un punto di vista generale, valutando la fattibilità di tali sistemi. Le diverse condizioni operative vengono simulate in geometria bidimensionale utilizzando il modello CFD (Computational Fluid Dynamics).

2. CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA.

Facendo riferimento alla fig. 1, il sistema è costituito da un camino posto al centro dell'edificio su cui affacciano le griglie di ventilazione dei vari ambienti. Il sistema è alimentato da una piastra calda posta alla base del camino. Attraverso opportune prese d'aria poste in corrispondenza della piastra calda, è possibile instaurare un moto ascensionale che "richiama" aria dagli ambienti innescando una ventilazione naturale degli stessi.

La piastra calda, posta alla base del camino, è mantenuta tale da un sistema di accumulo ad acqua che si "carica" durante il periodo diurno attraverso pannelli solari termici a convezione naturale. Durante il periodo notturno, il moto ascensionale all'interno del camino richiama aria fresca dall'esterno. Nelle zone climatiche in cui la temperatura notturna estiva scende in modo significativo rispetto a quella diurna, tale ventilazione consente un raffrescamento notturno degli ambienti.

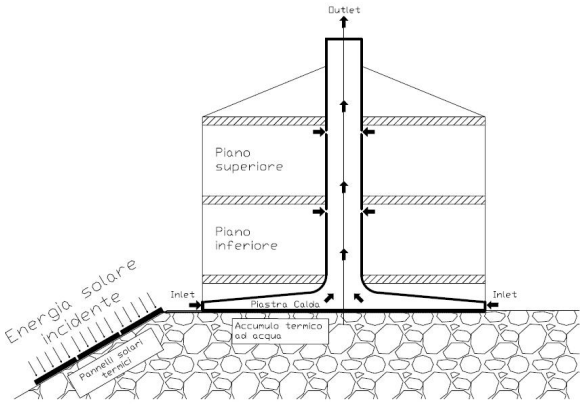


Fig. 1 – Schema camino.

3. DESCRIZIONE DEL MODELLO.

Come è noto in letteratura, le equazioni che descrivono il fenomeno sono: l'equazione di continuità, la conservazione della quantità di moto e del bilancio energetico (equazione di conservazione dell'energia). In particolare, relativamente alla equazione del momento lungo l'asse del camino si è assunta l'approssimazione di Boussinesq secondo la quale viene considerata costante la densità in tutti i termini ad eccezione di quello relativo all'energia potenziale.

Per i sistemi a convezione naturale è necessario inoltre considerare il valore del numero di Rayleigh, che può essere utilizzato come criterio per stabilire se il flusso è laminare o turbolento:

$$Ra = \frac{g\beta(T_H - T_C)L^3}{\nu\alpha}$$

dove T_H e T_C sono rispettivamente la massima e la minima temperatura presente nel sistema, L la dimensione caratteristica del flusso. Se si prende come dimensione caratteristica l'altezza del collettore, il valore del numero di Rayleigh del sistema considerato è maggiore del valore critico $Ra > 10^9$.

Quindi le equazioni che descrivono il sistema per il caso stazionario, bidimensionale con fluido incomprimibile diventano:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho\overline{u_i' u_j'}\right) - \rho\beta(T - T_0)g_i$$

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\lambda}{C_p}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho\overline{u_i' T'}\right)$$

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

dove G_k e G_b rappresentano rispettivamente la produzione di energia cinetica turbolenta dovuta ai gradienti della velocità media e alle forze di galleggiamento.

Sono state imposte le seguenti condizioni al contorno:

- pareti del camino e copertura della piastra calda adiabatica;
- temperatura della piastra calda costante;
- velocità dell'aria nulla in corrispondenza delle pareti del camino;
- pressione, temperatura e intensità della turbolenza imposte ad una certa distanza sia dall'imbocco della piastra calda sia all'uscita del camino;
- condizioni di temperatura e pressione negli ambienti assegnati.

Per il modello di turbolenza standard il valore delle costanti è il seguente:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \qquad C_{2\varepsilon} = 1.92 \qquad C_{3\varepsilon} = \tanh|v/u|$$
$$C_\mu = 0.09 \qquad \sigma_k = 1.0 \qquad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Il dominio di calcolo è formato dal camino e dal collettore d'aria. In più sono state aggiunte alcune superfici di controllo in modo da poter fissare le relative condizioni al contorno sufficientemente lontane dall'imbocco e dagli sbocchi del flusso d'aria in condizioni di regime (figg. 2 e 3).

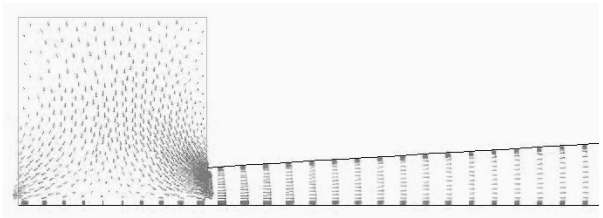


Fig. 2 – A sinistra, superficie di controllo all'imbocco del collettore.

E' stata utilizzata una mesh ibrida composta da 13000 elementi la cui densità varia aumentando in vicinanza delle pareti solide del modello. Le equazioni discretizzate sono state risolte attraverso l'utilizzo del programma FLUENT con una formulazione ai volumi di controllo applicando il metodo alle differenze finite. Per cogliere con sufficiente approssimazione il comportamento turbolento del fluido in prossimità della parete è stato utilizzato un approccio con "standard near wall function".

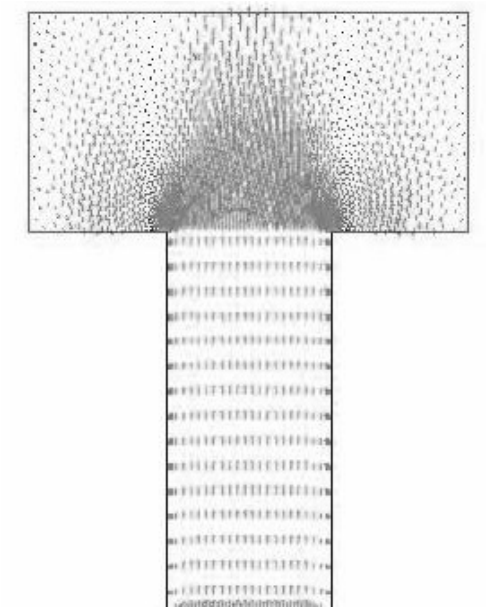


Fig. 3 – In alto, superficie di controllo allo sbocco del camino.

Le equazioni accoppiate di pressione e velocità sono state risolte utilizzando l'algoritmo SIMPLEC e uno schema di discretizzazione del secondo ordine.

Il modello è stato validato con risultati sperimentali disponibili in letteratura [1-2].

4. CONFIGURAZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE.

Nella simulazione si è fatto riferimento ad una unità immobiliare di due piani fuori terra. In tale ipotesi si è considerato un camino di altezza 12 m dal piano campagna, di dimensioni variabili (secondo i diametri commerciali): 0,75; 1,5; 3 metri. Si è potuto verificare che, un aumento dell'altezza fino al 30 - 40 % non comporta significative variazioni nel regime fluidodinamico.

Gli ambienti abitativi comunicano con il camino solare tramite delle griglie di aerazione di dimensione 20 x 40 cm, poste nella parte alta di ciascun ambiente. Come già accennato, non è stato preso in considerazione l'intero volume degli ambienti interni, limitando l'estensione del dominio con opportune superfici di controllo in prossimità delle bocchette di ciascun ambiente. La temperatura di progetto all'interno degli ambienti è stata fissata a 20 °C.

Considerando che il sistema è dedicato solo al funzionamento notturno, in zone climatiche dove si verifica una significativa escursione termica tra il giorno e la notte, nelle simulazioni si è fatto riferimento ad una temperatura esterna di 15 °C. Per quanto attiene la temperatura della piastra calda posta alla base del camino, si è presa in considerazione una variazione di temperatura compresa tra 25 °C e 65 °C.

Relativamente alle condizioni fluidodinamiche allo sbocco del camino, si è considerata aria calma e cioè assenza di vento.

I valori delle portate in m^3 sono stati estrapolati dai risultati delle simulazioni, moltiplicando il valor medio delle velocità calcolate per le relative superfici.

5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI.

Nella fig. 4 sono graficati gli andamenti delle portate totali all'uscita del camino. Come si può notare dalle curve, l'andamento delle portate cresce con l'aumentare della temperatura della piastra calda e all'aumentare del diametro del camino. Avendo considerato le pareti del camino adiabatiche, tutto lo scambio termico si realizza all'interno del collettore. A regime il sistema innesca un tiraggio naturale che risulta tanto maggiore quanto maggiore è la variazione di temperatura tra l'aria all'ingresso del collettore e la temperatura raggiunta dalla piastra calda; varia così la densità dell'aria che viene sospinta verso l'alto per le spinte di galleggiamento. Il processo si innesca indipendentemente dalle dimensioni del diametro del camino, a parità di dimensioni del collettore e della piastra scaldante. Le portate risultano maggiori con il crescere del diametro.

Nel momento in cui l'aria si scalda e comincia a verificarsi il tiraggio tipico di un camino, il sistema raggiunge rapidamente la condizione di regime perché all'aumentare del moto dell'aria, migliora il coefficiente di scambio termico alla piastra, come mostrato nella fig. 5.

Nel momento in cui si innesca il moto ascensionale del fluido all'interno del camino, le bocchette delle stanze, sia inferiori che superiori, risultano poste in depressione: viene aspirata aria dagli ambienti verso lo sbocco del camino. Come mostrato dall'andamento della pressione lungo l'asse centrale del camino, in prossimità delle bocchette vi è un'ulteriore diminuzione della pressione (fig. 6).

Quest'andamento è più marcato nel caso del camino di dimensioni minori e tende ad essere più esiguo all'aumentare del diametro del camino.

Il camino di dimensioni maggiori risente meno della presenza delle bocchette e offre salti di pressioni maggiori, garantendo quindi un tiraggio migliore come evidenziato dalla fig. 7.

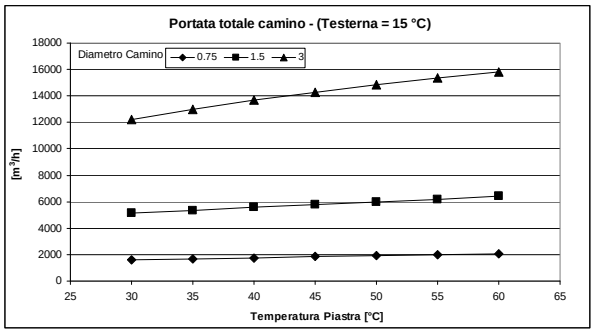


Fig. 4 – Andamento della portata totale del camino in funzione della temperatura della piastra calda e dei diametri del camino.

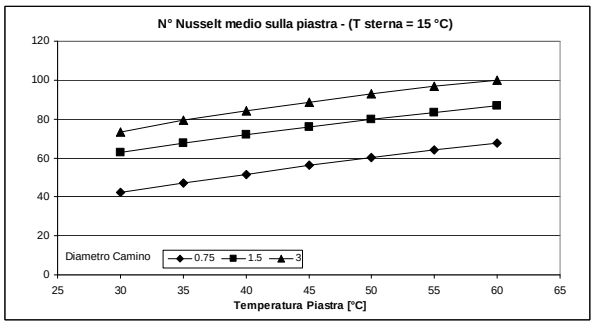


Fig. 5 – Andamento del numero di Nusselt al variare della temperatura della piastra calda.

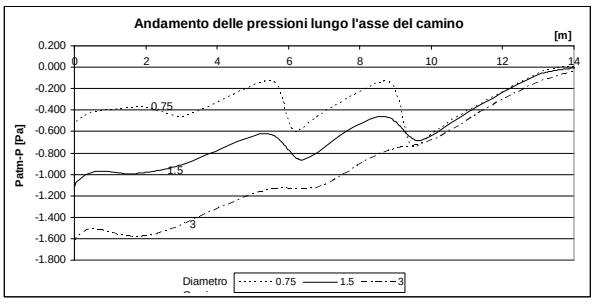


Fig. 6 – Andamento della pressione all'asse centrale del camino in funzione dell'altezza e del diametro.

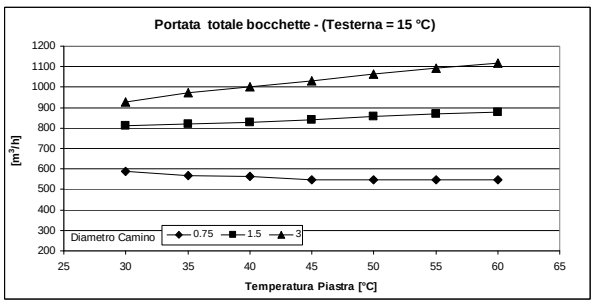


Fig. 7 – Andamento della portata totale delle bocchette di aspirazione in funzione della temperatura della piastra calda e dei diametri del camino.

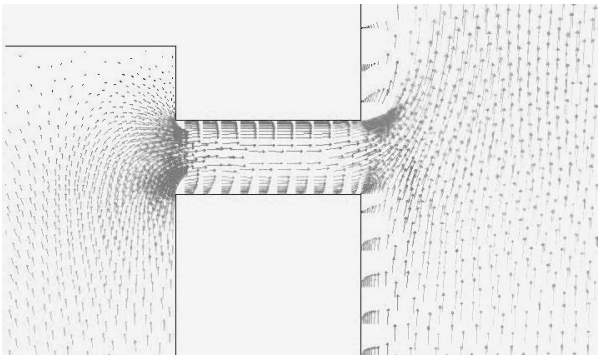


Fig. 8 – Dettaglio del campo fluidodinamica in prossimità della bocchetta della stanza.

Analizzando separatamente le differenze di comportamento tra le bocchette al piano inferiore e quelle al piano superiore, si nota che gli ambienti inferiori risultano godere di maggiori ricambi d'aria perché serviti da una depressione maggiore alla rispettiva bocchetta (figg. 9 e 10).

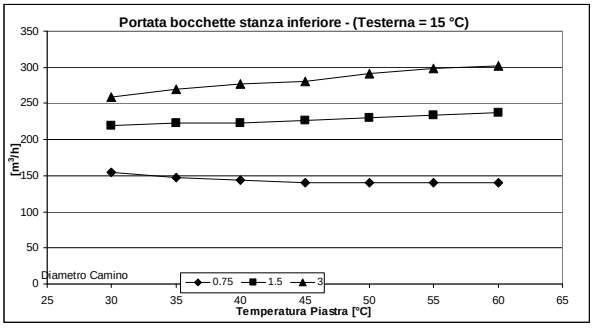


Fig. 9 – Andamento della portata alla bocchetta della stanza inferiore al variare della temperatura della piastra calda e dei diametri del camino.

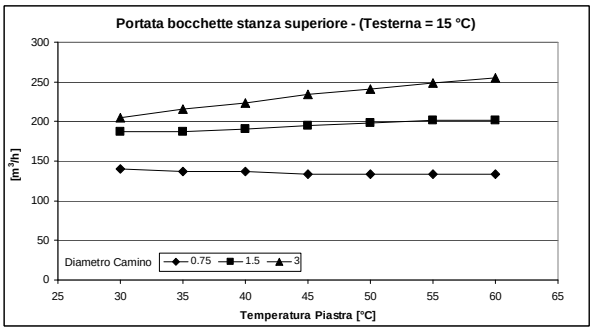


Fig. 10 – Andamento della portata alla bocchetta della stanza superiore al variare della temperatura della piastra calda e dei diametri del camino.

Sono state eseguite ulteriori simulazioni variando il valore della temperatura esterna. Dal valore di 15 °C, tipico di una condizione notturna estiva, la temperatura esterna è stata aumentata fino a 25 °C, per analizzare il comportamento del sistema anche in presenza di escursioni termiche non troppo marcate. Le simulazioni hanno evidenziato significative variazioni del campo fluidodinamico. Come mostrato nella fig. 11, le portate migliorano all'aumentare della differenza di temperatura tra l'aria esterna e la piastra calda.

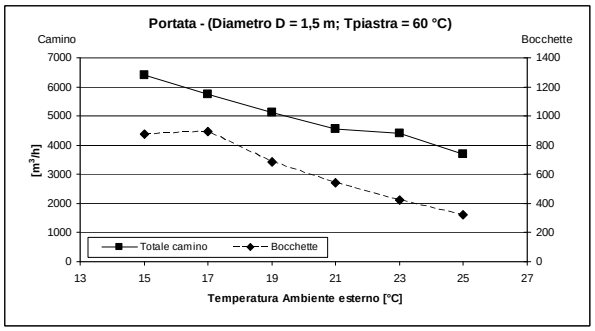


Fig. 11 – Andamento delle portate del camino e delle bocchette in funzione della temperatura esterna.

6. CONCLUSIONI

Dalle simulazioni eseguite risulta che:

- camini con diametri maggiori offrono portate maggiori e risentono meno delle discontinuità alle pareti (bocchette);
- già a bassi valori della temperatura della piastra, la depressione che si genera per la presenza del camino, è sufficiente a garantire la ventilazione degli ambienti;
- il sistema risulta essere più efficiente in condizione di regime notturno con forti escursioni termiche.

Eventuali sviluppi per le future ricerche in quest'ambito potrebbero analizzare con maggior dettaglio l'influenza delle condizioni atmosferiche esterne (presenza di venti dominanti) sulla resa globale del sistema e l'andamento della temperatura all'interno degli ambienti serviti in relazione al mantenimento delle condizioni di benessere. Un ulteriore contributo potrebbe essere dato da una valida analisi dei costi-benefici derivata dall'adozione di un tale sistema.

7. BIBLIOGRAFIA

1. M. Santos Bernardes, W. Von Backstrom, Analysis of some available heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant colectors, Solar Energy 83 (2009) 264-275.
2. T. Ming, W. Liu, Y. Pan, G. Xu, Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer, Energy Conversion and Management 49 (2008) 2872-2879.
3. S. Nizetic, N. Ninic, B. Klarin, Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the Mediterranean region, Energy 33 (2008) 1680 – 1690.
4. X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, Analysis of chimney height for solar chimney power plant, Applied Thermal Engineering 29 (200) 178 – 185.
5. X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, G. Hou, Experimental study of temperature field in a solar chimney power setup, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 2044-2050.
6. K. H. Lee, R. K. Strand, Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney, Energy and Buildings 41 (2009) 615-621.

CIPPATO DI LEGNA PER L'EDILIZIA RESIDENZIALE: IL PRIMO IMPIANTO TERMICO IN UMBRIA

Gianluca Cavalaglio[1], Stefano Cotana[1], Alessandro Petrozzi[1]

[1]Centro di Ricerca sulle Biomasse, Via G. Duranti – 06125 Perugia (Pg) Tel. +39.075.585.3806
cavalaglio@crbnet.it, cotanas@tiscali.it, petrozzi@crbnet.it

SOMMARIO

L'impiego di energie rinnovabili nell'edilizia residenziale ha visto una massiccia diffusione di impianti fotovoltaici e di pannelli solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria. Meno comune è invece la sostituzione di un combustibile come il metano che, nell'uso comune, è pratico e a basso impatto ambientale. Esistono delle situazioni nel campo dell'edilizia, come le abitazioni dotate di spazi sufficienti, ove l'installazione di una caldaia a cippato può essere economicamente molto vantaggiosa anche in virtù degli incentivi a disposizione. Nel presente lavoro viene descritta la realizzazione di un impianto di potenza pari a 100 kW termici, installato a servizio di un'abitazione bifamiliare. È stata eseguita un'analisi tecnico-economica dell'intervento; i risultati del primo anno di monitoraggio sono illustrati e commentati, confrontandoli con il funzionamento di un'analoga caldaia a metano. Sono stati analizzati vari scenari sotto diverse ipotesi del prezzo dei carburanti. I risultati della ricerca, in considerazione del fatto che è il primo impianto civile installato in Umbria, possono essere particolarmente significativi in vista di una diffusione di questa tecnologia impiantistica.

1. INTRODUZIONE

L'aumento del costo dei combustibili fossili e la crisi energetica spingono a considerare diverse alternative per soddisfare le richieste energetiche dell'edilizia residenziale.

Gli impianti fotovoltaici per la produzione di energia elettrica hanno avuto negli ultimi anni un fortissimo sviluppo, quadruplicando il numero di installazioni dal 2007 al 2008; in particolare gli impianti di piccola taglia, di potenza inferiore ai 3 kWp, utilizzati principalmente nel settore residenziale, sono complessivamente oltre 15.000 con una potenza elettrica generata di 40 MW. [1,2]

L'impiego di impianti solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria è una prassi comune, e spesso obbligatoria, nella costruzione di nuovi edifici; tra il 2006 e il 2008 la superficie complessiva dei pannelli solari è raddoppiata (da 0.77 a 1.5 milioni di m^2), portando la potenza termica installata ad oltre 1 GW. [3,4]

Lo sviluppo di impianti a biomassa di piccola taglia nel settore residenziale trova invece maggiori difficoltà, in quanto il cippato si trova a competere con un combustibile pratico e a basso impatto ambientale come il metano. L'impiego di biocombustibili per il riscaldamento si è mantenuto pressoché costante negli ultimi anni, con un produzione di energia termica pari a 440 GWh. [5]

Esistono numerose situazioni nel campo dell'edilizia, come ad esempio le abitazioni che dispongono di spazi sufficienti, dove l'installazione di una caldaia a cippato può risultare economicamente vantaggiosa, grazie anche agli sgravi fiscali previsti dalla normativa che permettono di ottenere un credito di imposta pari al 55% del costo dell'impianto a biomasse. [6]

Nel presente lavoro viene descritta la progettazione, la realizzazione ed il monitoraggio di un impianto a cippato di legna, di potenza pari a 100 kW termici, installato presso un'abitazione bifamiliare, per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria. E' stato eseguito un monitoraggio durante il primo anno di funzionamento, con un'analisi dei costi di gestione e manutenzione; è stata eseguita un'analisi tecnico-economica dell'intervento, valutando i tempi di ritorno dell'investimento, confrontando i risultati con un analogo impianto a metano, analizzando infine diversi scenari di variazione del prezzo dei carburanti.

2. IMPIANTI DI RISCALDAMENTO E COMBUSTIBILI

Gli odierni impianti di riscaldamento domestico utilizzano nella maggioranza dei casi come combustibile gas naturale, che nel corso degli ultimi anni è andato progressivamente a sostituirsi al gasolio e all'olio combustibile, come mostrato in figura 1; la proiezione fino al 2015 evidenzia ancora un aumento del consumo di metano a scapito degli altri combustibili [7-9]

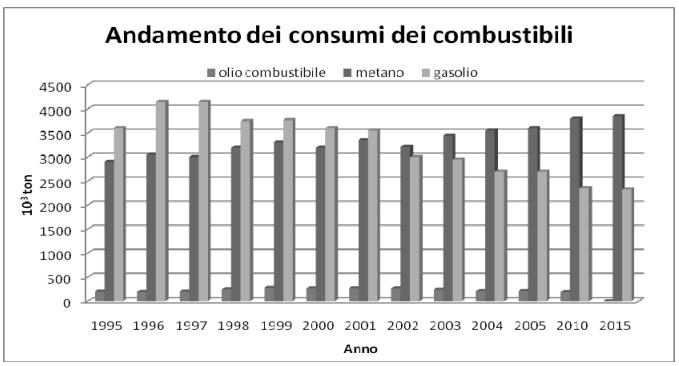


Figura 1: Andamento dei consumi dei combustibili nel periodo 1995-2003 e previsioni al 2015

Gli impianti di riscaldamento si distinguono in impianti autonomi ed impianti centralizzati. Un impianto di riscaldamento autonomo è costituito da una caldaia di produzione di acqua calda, da un sistema di scarico in atmosfera dei residui della combustione attraverso la canna fumaria e da una rete di distribuzione per l'adduzione del fluido riscaldato agli elementi terminali che provvedono alla climatizzazione degli ambienti costituenti l'unità abitativa. La presenza di termostati ambiente regola il funzionamento della caldaia, in funzione della temperatura impostata dall'utenza, comandando accensioni e spegnimenti dell'impianto. La caratteristica di modulabilità dell'impianto di riscaldamento in funzione delle singole esigenze è stato il punto di forza dello sviluppo di tali impianti negli ultimi trenta anni.

Un impianto di riscaldamento centralizzato è costituito da una o più caldaie e relativi sistemi di scarico dei residui della combustione, mentre si differenzia da un impianto autonomo per la rete di distribuzione. Gli impianti centralizzati, a seconda della rete di distribuzione, si distinguono in:

a) impianti a colonne montanti (distribuzione verticale): sono costituiti da un anello, formato da una tubazione di mandata e una di ritorno, che percorre la base dell'edificio e dal quale si dipartono le colonne montanti che alimentano i terminali posti sulla stessa verticale ai vari piani dell'edificio;

b) impianti a zone (distribuzione orizzontale): sono costituiti da una colonna montante che alimenta più anelli, uno per ciascun appartamento.

La figura 2 riporta uno schema delle due tipologie di impianto descritte. Il sistema di termoregolazione di un impianto centralizzato è generalmente costituito da una centralina di controllo con la quale si impostano i tempi di accensione dell'impianto (stabiliti per la legge a seconda della zona climatica di appartenenza) e con la quale si regola automaticamente la temperatura di mandata dell'acqua ai corpi scaldanti in funzione della temperatura esterna, rilevata con una sonda di temperatura [10].

In prima analisi, considerando impianti condominiali di vecchia generazione, la diffusione di impianti di riscaldamento autonomi sembra la soluzione che garantisce una maggiore libertà di scelta e risparmio nei consumi; va però considerato che la tecnologia ha messo a disposizione strumenti come i contabilizzatori di calore e le valvole motorizzate, che consentono anche agli impianti centralizzati di quantificare e personalizzare le esigenze delle singole utenze.

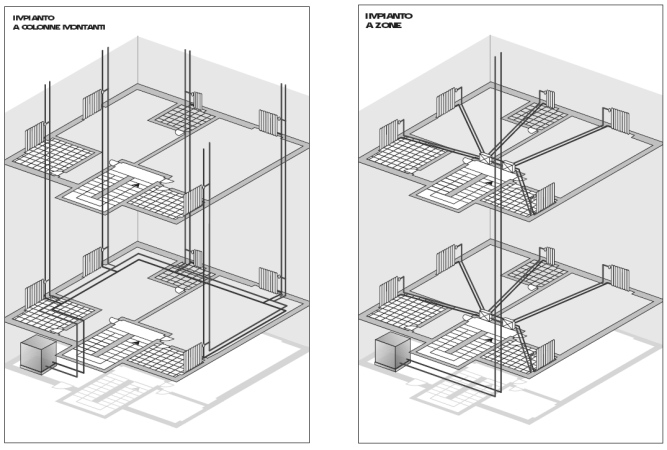


Figura 2: Schema di impianto a colonne montanti e a zone [11].

I vantaggi degli impianti centralizzati sono:

- alto rendimento del generatore di calore;
- minor potenza termica da installare: la sostituzione di tanti generatori di calore autonomi con uno centralizzato richiede una potenza termica molto minore della somma delle potenze dei singoli generatori, con conseguente minor consumo e minor impatto sull'ambiente;
- possibilità di utilizzo in impianti centralizzati di combustibili alternativi al metano, come pellet, legname, biomasse;
- minori costi di manutenzione ordinaria e straordinaria, ripartiti fra tutti i condomini;
- eliminazione dei pericoli derivanti dalla presenza di caldaie all'interno degli alloggi con probabilità di incidenti dovuti a fughe di gas, esplosioni, o cattivo funzionamento dei sistemi di espulsione dei fumi;
- ripartizione delle spese in base ai consumi effettivi, che responsabilizza il singolo all'uso parsimonioso e all'attenzione agli sprechi;
- facilità nel controllo e nel monitoraggio dei consumi;
- esenzione dei singoli dall'obbligo di provvedere annualmente in proprio ai controlli ed alle denunce dell'impianto autonomo.

3. PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO A BIOMASSE LEGNOSE

3.1 Descrizione dell'intervento e dello stato ante-operam

L'intervento riguarda la progettazione e la realizzazione di un nuovo impianto di riscaldamento alimentato a cippato di legno a servizio di un fabbricato civile. Il fabbricato è sito nel Comune di Perugia ed è suddiviso in due unità residenziali adibite a civile abitazione.

L'edificio avente pianta rettangolare, è costituito da tre piani, uno seminterrato e due fuori terra. La tipologia costruttiva dell'edificio, il cui anno di costruzione risale al 1975, è una struttura portante in cemento armato con tamponatura a cassetta e rivestimento esterno in parte in pietra (piano seminterrato) e in parte in mattoni (piano terra e piano primo). La superficie utile complessiva delle due unità immobiliari è di 502,48 m^2.

Allo stato ante-operam le due unità immobiliari sono servite da un impianto termico centralizzato, con distribuzione a colonne montanti e sviluppo orizzontale ai vari piani, alimentato da una caldaia a policombustibili del tipo a basamento, posto nel locale adibito a centrale termica sito al piano seminterrato. In origine il combustibile impiegato per l'alimentazione della caldaia era il gasolio, con serbatoi cisterna interrati esternamente, nella zona prospiciente la centrale termica; con le opere di metanizzazione, che hanno interessato la zona attorno agli anni '80, si è provveduto alla conversione del bruciatore per l'alimentazione della caldaia con uno a metano. All'interno delle due unità immobiliari i terminali di erogazione del calore sono costituiti da radiatori in ghisa; il sistema di regolazione della temperatura è centralizzato con valvole termostatiche per la regolazione dei singoli ambienti.

Lo schema funzionale dello stato ante-operam dell'impianto di riscaldamento è riportato in figura 3.

Le caratteristiche dell'impianto di riscaldamento sono:

- impianto di tipo centralizzato;
- terminali di erogazione del calore in radiatori in ghisa;
- distribuzione del tipo a colonne montanti;
- regolazione dell'impianto centralizzata e con valvole termostatiche per la regolazione dei singoli ambienti;

- generatore del tipo a caldaia a basamento, con alimentazione a metano;
- potenza nominale al focolare del generatore di calore pari a 86.000 kcal/h (110 kW).

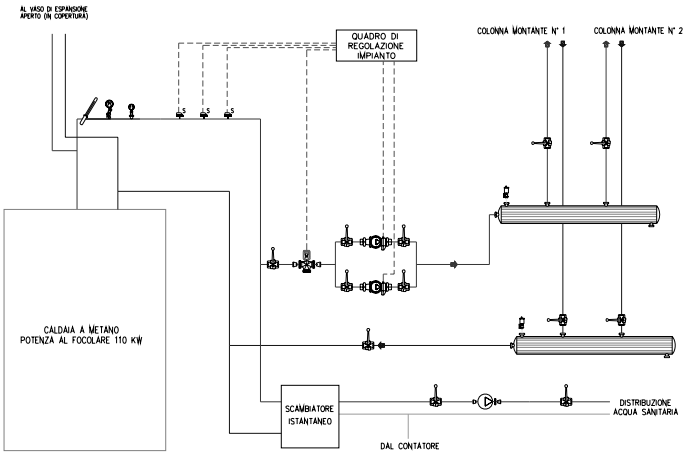


Figura 3: Schema funzionale impianto termico ante-operam

Dai calcoli eseguiti in conformità delle normative vigenti in considerazione delle caratteristiche climatiche relative al sito di costruzione dell'edificio, risultano i seguenti indici:

- Indice di Prestazione Energetica per la climatizzazione invernale proprio dell'edificio:

(Epi): 177,91 kWh/m^2 anno

- Il pertinente valore limite dell'Indice di Prestazione Energetica Limite per la climatizzazione invernale:

(Epilimite): 107,32 kWh/m^2 anno

Il generatore di calore alimentato a metano, con caldaia a basamento della potenza nominale di 110 kW al servizio delle due unità immobiliari, in base alla media delle rilevazioni effettuate attraverso le fatturazioni degli ultimi anni, consuma circa 7.800 m^3 di metano all'anno per la climatizzazione ambientale e per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria delle due unità immobiliari, con una temperatura media dei locali riscaldati di 16,5 °C.

Il costo medio annuo derivante dal consumo di 7.800 m^3 di metano è di circa 7.500 □ ripartiti in base alle quote millesimale tra le due unità immobiliari, non essendo presenti contabilizzatori di calore per una valutazione dei consumi reali individuali.

Dalla combustione di 7.800 m^3 di metano si ha ogni anno una produzione di calore al bruciatore di circa 66.953.000 kcal (279.864 MJ).

3.2 Stato di Progetto

Contestualmente alla realizzazione di una serie di opere edili finalizzati alla creazione di locali ad uso garage e magazzino, e la realizzazione di una piscina con opere di sistemazione esterna, i proprietari hanno optato anche per la sostituzione della vecchia caldaia alimentata a metano. Dopo avere valutato varie alternative la scelta è caduta sulla realizzazione di un impianto di riscaldamento alimentato a biomasse legnose, in particolare a cippato di legna, che è risultato essere il compromesso migliore per economicità di funzionamento e reperibilità del combustibile.

La diffusione di impianti di riscaldamento alimentati a biomasse legnose è rallentata da alcuni importanti fattori: in primo luogo il non indifferente costo di acquisto della caldaia, notevolmente superiore a quello di una caldaia a metano; la necessità della creazione di locali accessori ad uso dell'impianto di riscaldamento, come deposito per lo stoccaggio del biocombustibile, a differenza degli impianti a metano che sono serviti da un tubo di alimentazione collegato alla rete del metanodotto; maggiori costi di manutenzione ordinaria (pulizia caldaia, raccolta ceneri); maggior consumo di energia elettrica dovuto al sistema di alimentazione che praticamente non esiste in una caldaia a metano; maggior controllo da parte dei proprietari sull'impianto a causa delle necessarie operazioni di rifornimento periodiche di combustibile.

La scelta della realizzazione di impianti di riscaldamento alimentati a cippato di legna ha a suo favore, oltre al prezzo di acquisto del combustibile molto basso, una variabilità dei prezzi che negli ultimi anni non ha conosciuto gli incrementi che invece si sono potuti riscontrare per i combustibili di origine fossile.

La stabilità del prezzo delle biomasse legnose è dettata dalla sua stessa natura, in quanto la reperibilità locale non incorre nelle problematiche proprie dei combustibili fossili, che sono oggetto nella maggioranza dei casi di lunghi trasporti ed hanno luoghi di produzione che sono interessati da fattori di instabilità politica ed economica che ne influenzano la variabilità dei costi.

Un fattore che risulta di particolare importanza nella scelta dell'installazione di impianti di produzione di calore da fonti alternative ai combustibili fossili è la possibilità di attingere ad agevolazioni fiscali da parte dello Stato, che permettono agli utilizzatori una riduzione importante dei tempi di rientro dell'investimento iniziale.

La legge finanziaria 2007, poi prorogata dalla legge finanziaria 2008 fino a tutto il 2010, dispone interessanti incentivi per il risparmio energetico, e nel particolare la detrazione dall'imposta lorda per una quota del 55% degli importi a carico dei contribuenti per la sostituzione di vecchi impianti esistenti con caldaie a biomassa, importi comprensivi sia della posa delle apparecchiature termiche, meccaniche, elettriche, sia delle opere idrauliche e murarie necessarie per la sostituzione a regola d'arte dell'impianto termico esistente [6-12]. I calcoli relativi al fabbisogno termico eseguiti sul fabbricato confermano la taglia della precedente caldaia e pertanto la caldaia a cippato avrà una potenza nominale di 100-110 kW [13]. Le caratteristiche tecniche della caldaia sono riportate nella tabella 1.

Tabella 1: Caratteristiche tecniche della caldaia a cippato [14]

Range di potenza	33-100 kW
Collegamento elettrico	400 V / 50 Hz
Potenza elettrica assorbita	650 W
Peso caldaia	1050 Kg
Contenuto d'acqua caldaia	300 l
Pressione di esercizio	3 bar
Temperatura massima di mandata	95°C
Temperatura minima di ritorno	55°C
Temperatura gas combusti	190°C
Massa fumi	295 Kg/h
Diametro canna fumaria	200 mm

La caldaia è costituita dai seguenti componenti [14]:

- sistema di regolazione dell'aria primaria e secondaria con un proprio ventilatore dell'aria di combustione;
- griglia automatica;

- ventilatore a tiraggio indotto;
- camera di combustione in refrattario che garantisce una temperatura uniforme nella zona di combustione anche con materiale molto umido;
- vano di post-combustione;
- scambiatore di calore multiplo con pulizia automatica dello scambiatore di calore;
- sistema automatico di rimozione della cenere dalla camera di combustione al cassetto cenere esterno e dallo scambiatore di calore al cassetto cenere esterno.

Determinata la potenza della caldaia a cippato, è necessario dimensionare il deposito del combustibile. Si considerano circa 1,8 m^3 di deposito per ogni kW di potere calorifico della caldaia, ottenendo un fabbisogno annuo di 198 m^3 di cippato. Ipotizzando un numero annuo di carichi pari a 5, si ottiene un volume del deposito pari a 40 m^3. Si prevede quindi la realizzazione di un locale deposito della dimensione di 4 x 4 m di base e 3 m di altezza.

La figura 4 riporta lo schema funzionale dello stato di progetto dell'impianto di riscaldamento e del sistema di distribuzione.

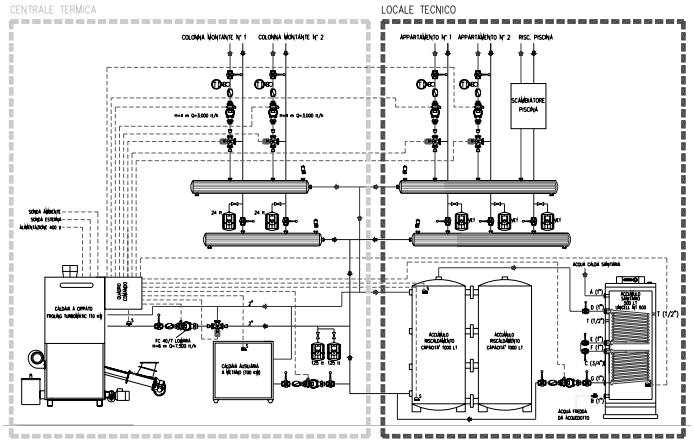


Figura 4: Schema funzionale di progetto dell'impianto termico

3.3 Realizzazione dell'impianto

Nel contesto dei lavori di ampliamento e di sistemazione esterna del fabbricato, l'installazione della centrale termica a biomasse ha richiesto la realizzazione del locale deposito del cippato, destinato all'alimentazione della caldaia. Si è provveduto alla costruzione di tale deposito con l'esecuzione di uno scatolare in cemento armato, parzialmente interrato, con una apertura nel solaio di copertura per permettere le operazioni di scarico del cippato tramite l'utilizzo di camion con cassone ribaltabile.

Il posizionamento del magazzino in adiacenza alla rampa che porta ai nuovi locali destinati a garage permette lo scarico del materiale anche con l'utilizzo di mezzi di piccole dimensioni, ideali per il trasporto dei quantitativi di cippato necessari ad ogni ricarica. Per facilitare le operazioni di scarico del cippato si è provveduto al prolungamento della botola di scarico fino al di fuori del locale deposito, con la creazione di uno scivolo in cemento armato che permette al cippato di terminare all'interno del deposito per caduta. La figura 5 mostra l'interno del silos ed il meccanismo di apertura della botola.

Il locale deposito deve avere una pavimentazione inclinata, di solito realizzata in legno, che deve essere autoportante e non appoggiato sul canale della coclea.

Per un utilizzo di tutto il materiale contenuto nel deposito si prevede l'istallazione di un estrattore a braccio a molla, poggiante sul pavimento.

Il sistema di alimentazione della caldaia è costituito da un canale di forma trapezoidale incassato nel pavimento del locale deposito al cui interno ruota una coclea che permette il trasporto del materiale.



Figura 5: Vista interna del silos di stoccaggio del cippato

L'installazione della caldaia a cippato consiste nell'assemblaggio dei vari componenti costituenti il corpo caldaia ed il sistema di alimentazione automatico del cippato.

La caldaia, dopo il suo assemblaggio, necessita del solo allaccio all'impianto di riscaldamento tramite il collegamento di una tubazione in ingresso dell'acqua fredda ed una in uscita di acqua calda, della connessione elettrica al pannello di comando che gestisce il funzionamento della caldaia in relazione a tutto l'impianto di riscaldamento, e del collegamento al sistema di espulsione dei gas combusti.

La figura 6 mostra una vista della corpo caldaia posto all'interno della centrale termica.



Figura 6: Caldaia a cippato

Si è provveduto all'installazione di due serbatoi di accumulo (accumulatori tampone) a stratificazione, da 1.000 litri ciascuno. Gli accumulatori permettono di immagazzinare il calore prodotto in eccesso dal generatore di calore e sono molto utili se abbinati a caldaie a biomasse: infatti tali caldaie non hanno la capacità di modulazione dei generatori alimentati con combustibili fossili, che possono accendersi e spegnersi istantaneamente, ma hanno tempi di accensione e spegnimento significativamente più lunghi. Il calore generato in eccesso dalla caldaia non viene disperso ma conservato negli accumulatori, che ne mantengono la temperatura a lungo per poi cederlo, quando richiesto, all'impianto di riscaldamento.

E' stato inoltre inserito un serbatoio di accumulo sanitario da 500 litri al posto del vecchio scambiatore istantaneo.

La gestione di tutto l'impianto è eseguita da un unico sistema di regolazione che, tramite i sensori installati su tutte le componenti dell'impianto, gestisce in maniera completamente autosufficiente l'impianto. Il quadro di comando controlla in maniera autonoma anche il sistema di alimentazione della caldaia e l'estrazione del cippato dal locale deposito.

Come si può rilevare dallo schema di funzionamento dell'impianto, nel locale tecnico esiste una derivazione per il collegamento dell'impianto di riscaldamento ad uso dell'abitazione con uno scambiatore per il riscaldamento dell'acqua della piscina di nuova realizzazione posta all'aperto nel giardino esterno al fabbricato. La cessione del calore per il riscaldamento dell'acqua della piscina avviene nello scambiatore, posto nel locale macchine della piscina, dove il calore proveniente dalla caldaia viene ceduto all'acqua nel circuito di trattamento dell'acqua della piscina.

4. MONITORAGGIO DELL'IMPIANTO E RISULTATI

4.1 Dati di monitoraggio dell'impianto

Il nuovo impianto di riscaldamento, alimentato da una caldaia a cippato di legna, è stato messo in funzione nel mese di ottobre 2008. I risultati del primo anno di funzionamento sono riportati nella tabella 2.

Tabella 2: Risultati del primo anno di funzionamento

Ore di funzionamento	1.877
Consumo di cippato	300 q
Ore di funzionamento giornaliere	5,14
Consumo orario di cippato	16 Kg/h

Tali dati derivano dal sistema di controllo automatico dell'impianto che permette la rilevazione delle ore di accensione della caldaia su basi medie mensili.

Nel prospetto seguente (Figura 7) sono riportati i consumi desunti nei vari mesi del primo anno di funzionamento ed i relativi consumi di cippato per l'alimentazione dell'impianto.

CONSUMO ANNUO DI CIPPATO													
	2008			2009									
	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE
ORE FUNZIONAMENTO GIORNALIERE (media mensile)	3,0	4,6	6,2	7,1	6,8	5,9	5,0	3,2	5,5	5,2	6,1	3,1
ORE FUNZIONAMENTO MENSILI	93,0	138,0	192,2	220,1	190,4	182,9	150,0	99,2	165,0	161,2	189,1	93,0
ORE FUNZIONAMENTO TOTALI ANNUE	423,2			1450,9								
	1877,1h/anno											
Kg CONSUMO MENSILE CIPPATO (16 Kg/h)	1488,0	2208,0	3075,1	3521,6	3046,4	2926,4	2400,0	1587,2	2640,0	2579,2	3025,6	1488,0
Kg CONSUMO TOTALI ANNUI CIPPATO	6771,1			23214,4								
	29985,5 kg/anno											

Figura 7: Consumo di cippato e ore di funzionamento mensili

Si può rilevare dal prospetto relativo alle ore di accensione dell'impianto e dei rispettivi consumi di cippato, come i tempi di funzionamento giornalieri siano relativamente costanti nell'arco dell'anno. Da novembre 2008 ad aprile 2009 la caldaia ha funzionato essenzialmente per la climatizzazione ambientale dei locali riscaldati delle due unità immobiliari e per la produzione di acqua calda sanitaria, con consumi massimi rilevati nel mese di gennaio. Nel mese di maggio 2009, in analogia ad ottobre 2008 e settembre 2009, si sono rilevati i consumi minimi, con l'impianto destinato essenzialmente alla produzione di acqua calda sanitaria. I consumi nel periodo estivo sono confrontabili ai valori relativi al periodo invernale, con 5,5 h/giorno di accensione della caldaia, in quanto, nei mesi di giugno, luglio ed agosto 2009, oltre alla produzione di acqua calda sanitaria, la caldaia ha provveduto al riscaldamento dell'acqua della piscina esterna.

Per il funzionamento dell'impianto, nell'arco di un anno, sono risultati sufficienti cinque rifornimenti da 60 q ciascuno, come era stato previsto in fase di progetto per il dimensionamento del locale deposito. Tali rifornimenti hanno avuto cadenza bimestrale nel periodo più freddo dell'anno, dove ovviamente il consumo di combustibile è risultato maggiore, mentre hanno avuto cadenza trimestrale nel periodo relativo alla primavera ed all'estate.

I rifornimenti sono stati eseguiti tramite l'utilizzo di camion di piccole dimensioni con cassone ribaltabile lateralmente, tale da permettere il conferimento del materiale legnoso direttamente all'interno del silos attraverso una botola.

Il prezzo di acquisto del cippato, comprensivo degli oneri relativi al trasporto ed alla consegna, è stato di 5 □/quintale, in linea con il prezzo di mercato riscontrabile in tutta Italia. Il costo annuale per il riscaldamento è stato quindi di 1500 □.

Dalla combustione annuale di 30.000 kg di cippato, considerato un potere calorifico inferiore di 3.000 kcal/kg, si ha una produzione di calore al bruciatore di circa 90.000.000 kcal (376200 MJ). Per l'ottenimento di un perfetto funzionamento della caldaia con conseguente miglioramento del rendimento di produzione del calore, è stato necessario eseguire da parte dei conduttori dell'impianto dei piccoli interventi di manutenzione:

- ogni 15 – 20 giorni si è dovuto provvedere allo svuotamento delle ceneri di risulta della combustione che la caldaia deposita automaticamente in un apposito cassetto ceneri ed alla pulizia della camera di combustione;
- ogni 40 – 60 giorni si è dovuto provvedere alla pulizia della zona fumi, con la rimozione delle polveri fini che si possono depositare nei condotti.

Entrambe le operazioni richiedono un tempo di esecuzione di pochi minuti. Le caratteristiche chimico-fisiche del cippato impiegato sono riportate nella tabella 3.

Tabella 3: Caratteristiche chimico-fisiche del cippato

Umidità relativa	34,37 %
Ceneri	2 % su base secca
Potere calorifico inferiore	4.100 kcal/Kg
Contenuto di carbonio	48,41%
Contenuto di idrogeno	4,99 %

Dalla combustione del biocombustibile, le ceneri di risulta sono circa il 2% in peso del cippato bruciato, in totale 6 quintali/anno. La cenere prodotta, se derivata dalla combustione di legno non trattato, è essenzialmente un fertilizzante ed il suo smaltimento può essere fatto in analogia alla componente organica dei rifiuti domestici.

4.2 Analisi economica dell'investimento

Allo stato ante operam l'impianto di riscaldamento era alimentato da un bruciatore a metano che, come ricavato dalla media delle fatturazioni dell'ente erogatore del gas naturale relative ai consumi degli ultimi anni, aveva un consumo di circa 7.800 m^3 (circa 67.000 Kcal/anno) di combustibile per un costo annuale di circa 7.500 □.

Dal confronto del nuovo impianto a biomasse legnose con il vecchio impianto a metano si è ricavato quale sarebbe stato il consumo annuo di metano necessario. Il consumo desunto sarebbe quindi di circa 10.496, 67 m^3/anno di metano per l'ottenimento di un risultato analogo all'utilizzo di 300 q di cippato. L'attuale prezzo d'acquisto del metano, rilevato dalle fatturazioni, è di circa 0,96 □/m^3 di metano consumato, quindi per il nuovo assetto sarebbe stata necessaria una spesa di 10.076,80 □/anno. La tabella 4 mostra i dati impiegati nell'analisi economica ed il tempo di ritorno semplice dell'investimento (circa 4,5 anni). La figura 8 mostra invece l'andamento del Valore Attuale Netto al variare del tasso di interesse.

Tabella 4: Dati impiegati nell'analisi economica dell'investimento

Dati impianto a cippato	
Potenza caldaia a biomassa	110 kW
Ore funzionamento annue	1.877
Consumo annuo di cippato	300 q/anno
Costo del cippato	5 □/q
Costi di investimento	
Costo acquisto e montaggio caldaia	□30.000,00
Costo opere edili	□30.000,00
Costo impiantistica idraulica ed elettrica	□15.000,00
Totale	*€ 75.000,00*
Costi di gestione impianto equivalente a metano	
Manutenzione	300 □/anno
Costo del biocombustibile	1.500 □/anno
Dati impianto a metano	
Consumo annuo di metano	10.497 m^3
Costo metano	0,96 □/m^3
Dati analisi economica	
Flusso di cassa primi 5 anni (detrazione IRPEF del 55% dell'investimento)	□16.526,80
Flusso di cassa dopo il 5° anno	□8.276,80
Tempo di ritorno semplice	4,5 anni

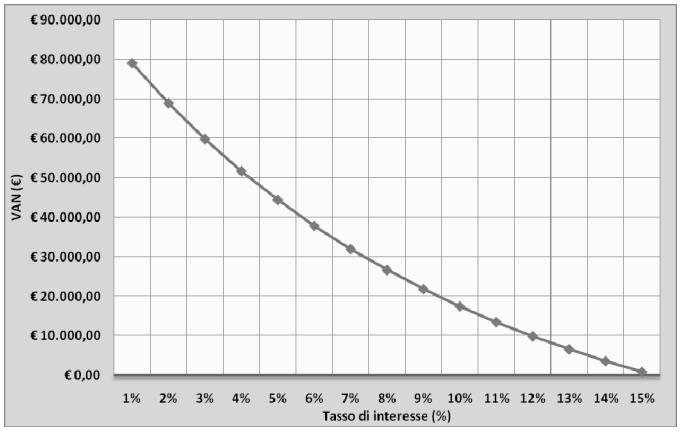


Figura 8: Valore Attuale Netto (VAN) dell'investimento

Ipotizzando un tasso di interesse del 5%, l'investimento è recuperato al decorrere del 5° anno di funzionamento dell'impianto. A partire dal 6° anno di funzionamento si avrà un risparmio sui consumi pari a circa 8.200 □/anno, dato dalla differenza tra il costo della gestione dell'impianto di riscaldamento, al servizio delle due unità immobiliari, tra metano e cippato di legna, ottenendo alla fine del ciclo di vita della caldaia un ricavo di oltre □ 4.000,00.

5. CONCLUSIONI

Nell'ambito del presente lavoro è stata seguita la progettazione e realizzazione di un impianto termico a cippato per usi civili; ne è stato inoltre monitorato il primo anno di funzionamento, registrando le attività di manutenzione necessarie e i consumi di biocombustibile.

E' stata infine eseguita un'analisi economica dell'investimento, confrontando i costi dell'impianto con quelli di un analogo impianto a metano. L'investimento iniziale, circa 75.000 □, grazieanche agli incentivi statali, ha una ammortamento di circa 5-6 anni. Il Valore Attuale Netto, considerando una vita utile dell'impianto di 15 anni ed un tasso di interesse del 5%, è di oltre 40.000,00 □ altermine dell'investimento.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Gestore Servizi Energetici, Statistiche sulle Fonti Rinnovabili in Italia, Anno 2008, 2009.
2. Gestore Servizi Energetici, Il Solare – Dati Statistici al 31 Dicembre 2008, 2009.
3. V. Verga, Solare Termico in Italia, quali Prospettive?, *Arpa* N.3 maggio-giugno 2009.
4. R. Battisti, T. Pauschinger, R. Salustri, L. Zingale, Il Decollo del Solare Termico in Italia – Centro Studi Solarexpo, 2007.
5. Enea, Rapporto Energia e Ambiente 2007-2008, I Dati, 2009.
6. Legge 27 Dicembre 2006, N. 296, Disposizioni per la Formazione del Bilancio Annuale e Pluriennale dello Stato, Finanziaria 2007.
7. F. Cotana, C. Buratti, E. Moretti, Analisi Comparata di Combustibili per Uso Civile – Contenuti e Risultati dell'Indagine Bibliografica, *La Termotecnica* Luglio-Agosto 2006.
8. Unione Petrolifera, Previsione di Domanda Energetica e Petrolifera Italiana 2003-2015, 2003.
9. Assocostieri, Rilevamento dei Consumi, 2004.
10. M. Dragone, H. P. Griesser, Contabilizzazione del calore, 2006.
11. Enea, Risparmio Energetico con gli Impianti di Riscaldamento, 2003.
12. Legge 24 Dicembre 2007 N.244, Disposizioni per la Formazione del Bilancio Annuale e Pluriennale dello Stato, Finanziaria 2008.
13. M Mascioni, Riscaldamento a Cippato di Legna per Civile Abitazione: il Primo Impianto in Umbria, Tesi di Laurea Università degli Studi di Perugia, 2009.
14. Froling, Documenti di Progettazione per Turbomatic TMC 28-55 e TMC 70-110, 2006.

SCAMBIO TERMICO CONVETTIVO NEI COMPONENTI ELETTRONICI: MODELLO CFD DEL TRANSITORIO DI RISCALDAMENTO PER UN'ALETTA DI RAFFREDDAMENTO

C. Sapia, G. Sozio

Dipartimento di Elettronica Applicata – Università degli Studi ROMA TRE
Via della Vasca Navale 84 – 00146 – Roma
Tel. 06.57337328 – Fax 06.57337026 – E-mail. sapia@uniroma3.it

SOMMARIO

In questa memoria vengono presentati i risultati dell'attività di ricerca volta ad una migliore comprensione della distribuzione dei flussi di convezione naturale per un'aletta di raffreddamento. Investigazioni a tal fine orientate possono consentire un adeguato dimensionamento dei volumi convettivi di lavoro e l'ottimizzazione del posizionamento relativo di più componenti, termicamente critici, all'interno di un sistema complesso (PCB).

Il comportamento termico di un componente elettronico rappresenta un tema di sempre più stringente interesse.

La convezione naturale, inoltre, costituisce il sistema di raffreddamento più semplice, affidabile ed a basso costo; rappresenta il metodo preferenziale per raffreddare dispositivi elettronici sempre più miniaturizzati (cellulari, computer palmari) ed a basso consumo.

L'aletta in analisi è stata selezionata di passo non uniforme (ST338K), geometria particolarmente ricorrente nei problemi di raffreddamento dei componenti elettronici. La visualizzazione dei flussi convettivi per la struttura in oggetto è stata attuata per via numerica, sviluppando al calcolatore un opportuno modello di fluidodinamica computazionale (CFD).

Particolare attenzione è stata dedicata all'analisi della fase transitoria del fenomeno convettivo, evidenziando l'evoluzione nel tempo dei flussi di convezione naturale nella fase di riscaldamento della struttura fino al raggiungimento dello stato stazionario. L'analisi del fenomeno transitorio è stata attuata con passo temporale di 0,001 secondi. La soluzione ha raggiunto convergenza con un tempo medio di calcolo di circa 13 giorni.

Con il modello CFD ottenuto e' stato possibile monitorare l'evoluzione dello strato laminare piano, evidenziando lo sviluppo temporale delle zone di stagnazione (a bassa velocità di ricircolo) per il fluido surriscaldato in movimento convettivo. Metodologie numeriche consentono, inoltre, un'estensione al tridimensionale dei risultati ottenuti, non facilmente ottenibile per via sperimentale.

INTRODUZIONE

Metodologie CFD di visualizzazione dei flussi consentono di dare indicazioni progettuali attendibili sia al problema del dimensionamento di una superficie alettata, sia agli aspetti di definizione dei volumi di lavoro ottimali per ciascun componente elettronico. Possono, inoltre, contribuire nel risolvere gli aspetti di posizionamento relativo dei componenti elettronici, termicamente più critici, all'interno di un sistema complesso come una PCB (*printed computer board*).

L'analisi computazionale della dinamica dei fluidi permette, dunque, di approfondire la comprensione di come il volume che racchiude il dispositivo da raffreddare influenzi l'efficienza di raffreddamento, di quale sia la spaziatura ottimale tra una serie di schede elettroniche inevitabilmente affiancate, di quanto la disposizione relativa di più componenti elettronici su di un'unica scheda madre influenzi il processo di raffreddamento

In un sistema elettronico complesso, l'indagine presentata potrà consentire, allora, sia di individuare e caratterizzare in dettaglio i componenti più critici da un punto di vista termico, sia di migliorare l'efficienza di raffreddamento complessiva attraverso semplice redistribuzione spaziale dei vari dispositivi componenti, al fine di limitare, ad esempio, la presenza di dannose sacche di stagnazione del fluido.

Lo scambio convettivo da superfici estese rappresenta ad oggi, il principale, maggiormente diffuso metodo di raffreddamento dei componenti elettronici. Metodi di raffreddamento basati sulla sola convezione naturale, semplice affidabile ed a basso costo, rivestono particolare interesse in tutte quelle situazioni dove esigenze di miniaturizzazione e silenziosità sono dominanti. Con superfici alettate, in aria e per sola convezione naturale (ed irraggiamento), si riesce a gestire una potenza termica da dissipare, per unità di superficie, di 0.1 W/cm^2 con una differenza di temperatura di ΔT=80 °C [1-4].

MODELLO NUMERICO

E' stata analizzato lo scambio termico per convezione naturale di una geometria particolarmente ricorrente nei problemi di raffreddamento dei componenti elettronici: un' aletta di raffreddamento per transistor di potenza (ST338K). L'aletta è stata alloggiata su di un supporto verticale controllato termicamente in temperatura.

Il modello termico della geometria d'interesse è stato implementato al calcolatore; l'analisi della termofluidodinamica è stata condotta attraverso lo sviluppo di un modello numerico tramite software CFD (computational fluid dynamics).

Le metodologie CFD consentono di analizzare fenomeni fisici spesso di difficile osservabilità, permettono di sviluppare i progetti prima della fase di realizzazione fisica, facilitando la ricerca di soluzioni innovative.

Consentono, inoltre, una estensione al tridimensionale dei risultati non facilmente ottenibile per via sperimentale.

Il fenomeno della convezione viene descritto [5-8] in questi metodi da un sistema di equazioni composto da:

- Equazione di continuità
- Equazione della quantità di moto
- Equazione dell' energia

Queste equazioni descrivono il comportamento e l'evoluzione delle componenti di velocità e delle proprietà termodinamiche: pressione P, densità ρ e temperatura T in funzione del tempo e delle coordinate spaziali.

Tale sistema di equazioni è comunemente detto equazioni di Navier-Stokes.

L'equazione per la conservazione della massa o equazione di continuità è la seguente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \right) = 0 \tag{1}$$

L'equazione di trasporto della quantità di moto, in un sistema di riferimento inerziale, è descritto da

$$\frac{\partial \left(\rho \vec{v} \right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\overline{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{2}$$

dove p è la pressione statica, $\overline{\overline{\tau}}$ è il tensore dello stress, e $\rho \vec{g}$ è la forza gravitazionale del corpo. F contiene altri termini sorgente che possono fuoriuscire dalle resistenze, dalle sorgenti, etc.

Il tensore dello stress $\overline{\overline{\tau}}$ è dato da

$$\overline{\overline{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^{T} \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \tag{3}$$

dove μ è la viscosità molecolare, I è il tensore unitario e il secondo termine sul lato destro è l'effetto della dilatazione del volume.

L'equazione dell'energia in una regione di fluido può essere scritta in termini di entalpia sensibile h come

$$\frac{\partial \left(\rho h \right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho h \vec{v} \right) = \nabla \cdot \left[(k + k_t) \nabla T \right] + S_h \tag{4}$$

dove k è la conducibilità molecolare, k_t è la conducibilità dovuta al trasporto turbolento ($k_t = c_p \mu_t / \mathrm{Pr}_t$) e il termine sorgente S_h include ogni sorgente volumetrica di calore che è stata definita.

L'oggetto è stato modellizzato in ambiente di lavoro Fluent (ver. 6.1); il materiale costituente la struttura è alluminio con le seguenti caratteristiche (*default*): densità 1 kg/m^3, calore specifico 1 $J / Kg \cdot K$, conducibilità 148 $W / m \cdot K$.

Le dimensioni dell'oggetto sono state definite riferendosi alla struttura reale (ST338K) in esame, con una larghezza di 4,29x10^{-2} m, un'altezza di 1,75x10^{-2} m e uno spessore di 2x10^{-3} m. Il supporto verticale controllato in temperatura è stato impostato con potenza di 1 W.

L'ambiente di sviluppo o *cabinet* è stato definito come un prisma dalle dimensioni 0.15m x 0,3m x 0,2m. Il fluido di scambio termico considerato è l'aria; la temperatura dell'ambiente circostante l'aletta è stata preimpostata a 20 °C con pressione di un'atmosfera.

La risoluzione numerica del problema ha comportato una discretizzazione dello spazio in analisi. Le *mesh* utilizzate sono state ottimizzate secondo una struttura del tipo *hexa unstructured*, con dimensioni massime lungo i tre assi cartesiani fissate in 0,003 m ed una spaziatura massima di 0,0001998. La *post-processing tolerance* è stata impostata in 10^{-4} (figura 1).

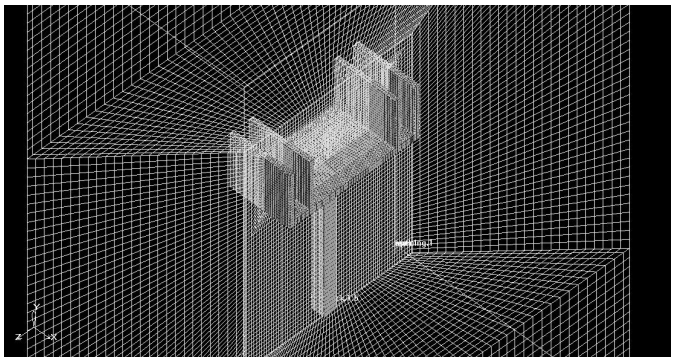


Figura 1: Struttura dell'oggetto e relativa *mesh* implementata.

E' stata condotta un'analisi non stazionaria, con un *time step* per la discretizzazione temporale pari a 0,001 s e 20 iterazioni per ogni *time step*.

I criteri di convergenza imposti (residui) per l'analisi transitoria sono 0,001 per il flusso e 1x10^{-7} per l'energia.

Il regime di flusso definito è stato di tipo laminare.

Differenti simulazioni, ciascuna di durata temporale variabile, hanno consentito di definire le condizioni ottimali di lavoro. La soluzione ha raggiunto convergenza con un tempo di calcolo medio di circa due settimane.

RISULTATI

Sono stati visualizzati numericamente i flussi convettivi generati durante il riscaldamento di un'aletta di raffreddamento [9-12] per transistor di potenza, del tipo ST338K.

Particolare attenzione è stata posta alla fase transitoria del fenomeno: è stata analizzata la distribuzione dei flussi dall'istante iniziale t=0 (aletta "fredda") monitorandone l'evoluzione temporale fino al raggiungimento dello stato stazionario. L'aletta è stata alloggiata su di un supporto verticale controllato elettricamente in temperatura (figura 1).

Le immagini presentate successivamente sono riferite ai profili di velocità (*speed*: m/s) ottenuti per piani di taglio, paralleli all'asse x, nella zona centrale dell'aletta (*cut plane* 0,506).

In figura 2 si possono osservare i flussi emergenti dalla struttura nella fase iniziale (t=0.2 s) del transitorio di riscaldamento. La regione interessata dai flussi di convezione risulta principalmente riferita ai profili verticali della struttura. Il ricircolo convettivo nelle altre zone risulta solo accennato.

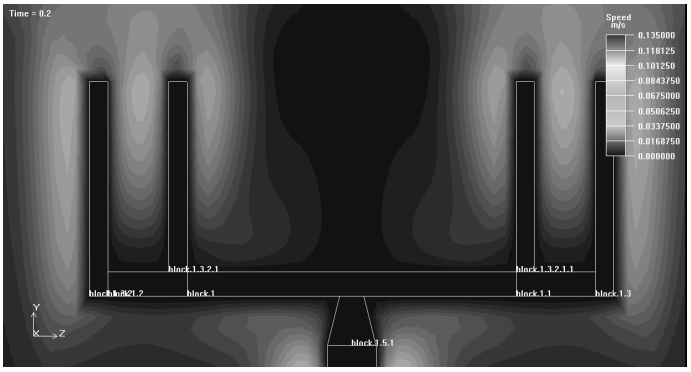


Figura 2: Profilo di velocità all'istante 0,2 s.

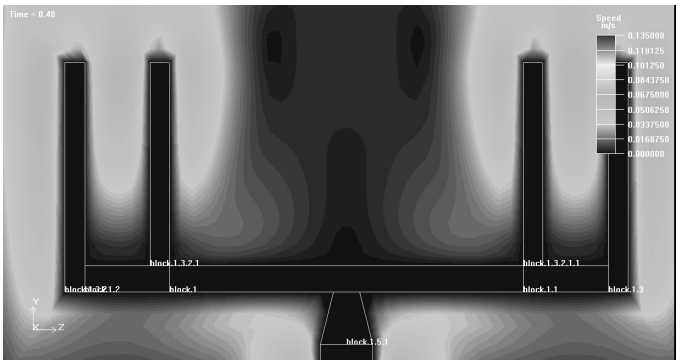


Figura 3: Profilo di velocità all'istante 0,48 s.

Con l'evolversi del transitorio di riscaldamento (figura 3) le zone di ricircolo appaiono adesso maggiormente strutturate: nella parte sottostante l'aletta l'impedimento aerodinamico orizzontale, rappresentato dalla base dell'aletta, si manifesta in zone di stagnazione discrete. Il fluido surriscaldato sottostante la struttura riesce ad emergere in galleggiamento convettivo solo lateralmente oltre l'estensione della base dell'aletta (figura 3-5).

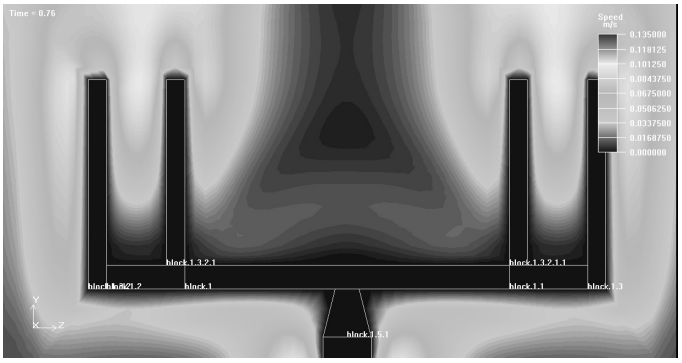


Figura 4: Profilo di velocità all'istante 0,76 s.

Dopo 0.76 s (figura 4) nella parte superiore della struttura comincia ad organizzarsi una singola zona centrale, di forma pressocchè triangolare, di stagnazione: lo scambio termico convettivo sui profili verticali tende sempre più ad espandersi estendendosi lateralmente fino quasi a congiungersi al di sopra della zona centrale.

In figura 5 è presentata la configurazione stazionaria del profilo di velocità per la configurazione in esame. La porzione centrale risulta adesso completamente compressa nella parte superiore, secondo una struttura a cupola. La zona centrale di stagnazione per il fluido surriscaldato appare ora organizzata in tre lobi discreti.

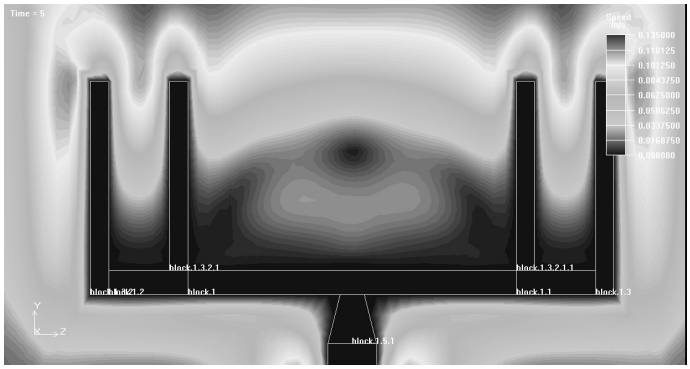


Figura 5: Profilo di velocità all'istante 5 s.

Con un differente angolo di visione (figura 8) è possibile apprezzare più compiutamente l'organizzazione dei flussi di convezione naturale della struttura relativamente allo stato stazionario. Risulta maggiormente visibile l'ampiezza dell'estensione laterale della zona interessata dal fenomeno convettivo e la completa organizzazione, secondo una forma a cupola, del confine superiore della zona di stagnazione del fluido caldo surriscaldato.

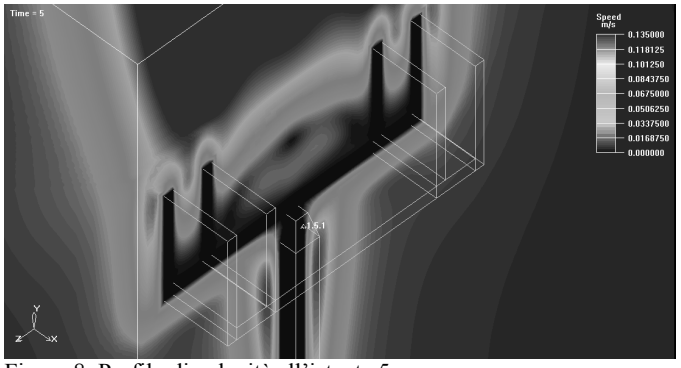


Figura 8: Profilo di velocità all'istante 5 s.

In figura 6 è presentato l'andamento nel tempo della temperatura rilevata nella zona centrale superiore dell'aletta (*hot spot*). Il picco di temperatura, risulta di circa 71 °C e viene raggiunto dopo un tempo di 1 sec (figura 6).

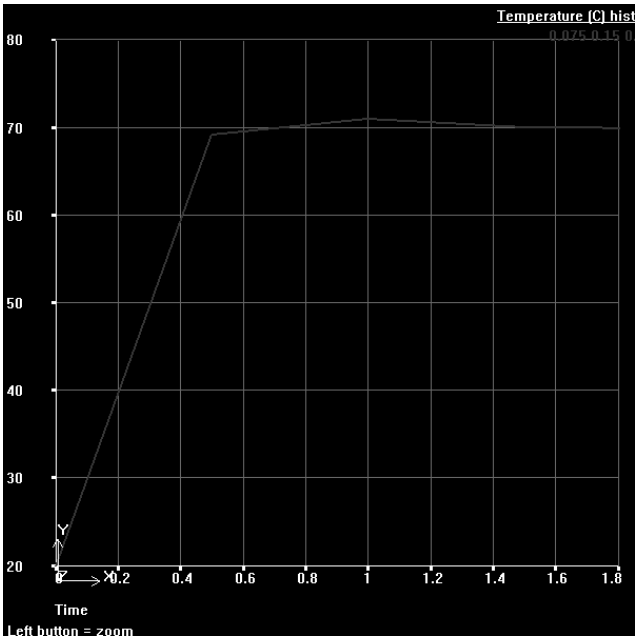


Figura 6: Grafico delle temperature nell'hot spot dell'aletta

In figura 7 è presentata la distribuzione di temperatura per il campo di misura in esame sempre all'istante t=1s.

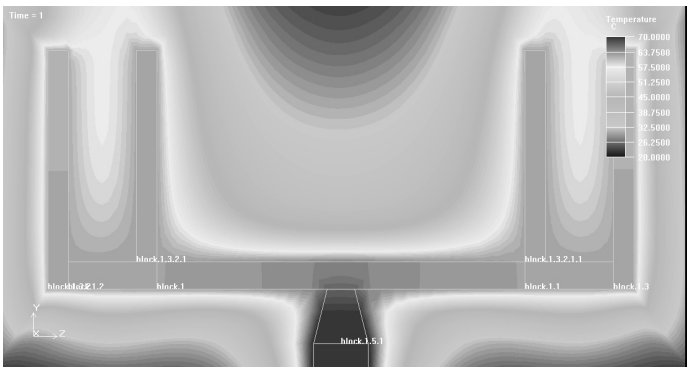


Figura 7: Profilo di temperatura all'istante 1 s.

CONCLUSIONI

Sono stati presentati i risultati della visualizzazione numerica CFD dei flussi convettivi per un'aletta di raffreddamento per un transistor di potenza.

Il modello computazionale sviluppato e qui proposto è stato testato su di una configurazione geometrica particolarmente ricorrente [13-14] nei problemi di raffreddamento dei componenti elettronici (*heat sink* ST338K).

Particolare attenzione è stata dedicata, in questo lavoro, all'analisi della fase transitoria del fenomeno convettivo. E' risultato possibile monitorare nel tempo l'evoluzione della distribuzione dei flussi di convezione naturale dall'istante iniziale t=0 (struttura "fredda") fino al raggiungimento dello stato stazionario. La configurazione stazionaria, evidenziata in fig. 5, viene raggiunta dopo un tempo di 5 sec. Sono state osservate, e monitorate nella rispettiva evoluzione temporale, differenti zone di stagnazione, caratterizzate da una bassa velocità di ricircolo convettivo, per il fluido surriscaldato.

Nella zona di posizionamento del transistor di potenza è stato monitorato, nel tempo, l'andamento della temperatura. Il picco di temperatura osservato è di 71 °C raggiunto dopo un tempo t=1s.

Lo studio presentato è stato attuato in maniera puramente numerica, quindi, senza perturbare il campo di flusso e, conseguentemente, senza alterare, come accadrebbe con sistemi basati su matrici di termocoppie o sistemi PIV (*particle image velocimetry*), la distribuzione di temperatura ed il processo di scambio termico in esame.

Il modello termofluidodinamico presentato ha consentito di analizzare lo sviluppo della convezione naturale e visualizzare l'andamento nel tempo dei flussi termici generati e dei picchi di temperatura corrispondenti.

E' stato, inoltre, possibile monitorare, nella sua evoluzione temporale, la distribuzione del campo termico convettivo, conseguente all'*hot spot* centrale rappresentato dal transistor, evidenziando, in particolar modo, le differenti zone di stagnazione, a bassa velocità di ricircolo, per il fluido surriscaldato emergente.

La visualizzazione, anche numerica, dei flussi termici [15-17] svolge un ruolo fondamentale nella progettazione dei componenti e sistemi elettronici: permette di anticipare, già in fase di progettazione, come si distribuiscono i flussi di convezione naturale, e, quindi, di ottimizzare il processo di scambio termico attraverso il dimensionamento di opportuni volumi di lavoro con adeguata riduzione delle zone di stagnazione termica scarsamente efficienti.

BIBLIOGRAFIA

1. Y.A Cengel. Introduction to Thermodynamics and heat transfer. McGraw-Hill Book Company, New York, 1997.
2. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1990.
3. Kreith, F. and Bohn, M.S., Principles of Heat Transfer, West Publishing, New York, 1993.
4. Kim, S.J., Lee, S.W., Air cooling technology for electronic equipment, CRC Press, Boca Raton, LA, 1996.
5. D. Anderson, J. Tannehill, and R. Fletcher. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.
6. S.V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Company, New York, 1980.
7. Babu, S.A. Korpela, On the Direct Solution of Poisson's Equation on Non-uniform Grid, J. Computational Physics, Vol.104, 93-98,1993.
8. C.A.J. Fletcher, Computational Techniques for Fluid Dynamics, Springer – Verlag Heidelberg New York, 2nd edition 2006.
9. Goldstein R. J., Volino R. J.: Onset and Development of Natural Convection Above a Suddenly Heated Horizontal Surface. *ASME J. Heat Transfer*, vol. 117, pp. 808-821, 1995.
10. K.C.Chiu, F.Rosenberger, Mixed Convection Between Horizontal Plates – I: Entrance Effects, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.30, No.8, pp.1645- 1654,1987.
11. F.P. Incropera, A.L. Knox, Mixed convection flow and heat transfer in the entry region of horizontal rectangular duct, Trans. ASME J. Heat Transfer, 9:434-439, May 1987.
12. R.J.A.Janssen, R.A.W.M.Henks and C.J. Hoogendoorn, Transition to time-periodicity of a natural-convection flow in a 3D differentially heated cavity, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol.36, No.11, pp.2927-2940,1993.
13. Sasaki, S. Kishimoto, Optimal structure for microgrooved cooling fan for high-power LSI devices, *Electron. Lett.* 22 (1986), pp. 1332–1334.
14. Octavio Leon, Gilbert De Mey and Erik Dick, Study of the optimal layout of cooling fins in forced convection cooling, Microelectronics Reliability, Elsevier, 2002.
15. Incropera, F. P., Convection heat transfer in electronic equipment cooling, *J. Heat Transfer*, vol. 110 No. 4, pp. 1097-1111, 1988.
16. Garimella, S. V., "Flow Visualization Methods and their Application in Electronic Systems," in Thermal Measurement in Electronic Cooling, Azar, K. (ed.), CRC Press LLC, New York, pp. 349-385, 1997.
17. A.J. Smits, The Interplay Between Experiments and Computation in the Study of Turbulance, Experimental Thermal and Fluid Science, 5:579-585, 1992.

SCAMBIO TERMICO IN CONVEZIONE NATURALE/FORZATA PER CELLE FOTOVOLTAICHE A MEDIA CONCENTRAZIONE

Federico Rossi[1], Andrea Nicolini[1], Beatrice Castellani[2], Margherita Giuliobello[3]

[1]CIRIAF, Via G. Duranti 67, Perugia
[2]Centro di Ricerca sulle Biomasse, Via G. Duranti, Perugia
[3]Consorzio IPASS Scarl, Via G. Guerra 23, Perugia

SOMMARIO

I sistemi fotovoltaici a media concentrazione costituiscono potenzialmente una valida alternativa ai sistemi tradizionali piani ed ai sistemi ad alta concentrazione, in quanto permettono l'impiego di tecnologie mature, derivabili direttamente dai pannelli piani.

I costi dei sistemi di inseguimento e di concentrazione sono inoltre estremamente contenuti.

Un parametro estremamente importante per l'efficacia di tali sistemi e quindi per la loro resa economica è la temperatura di esercizio delle celle, il cui aumento causa la diminuzione del rendimento di conversione delle celle stesse.

Nel presente lavoro si propone uno studio teorico-sperimentale volto all'individuazione dei campi termici su stringhe di pannelli fotovoltaici a media concentrazione che mette in evidenza l'effetto di diverse soluzioni impiantistiche sulla temperatura di esercizio e quindi sul rendimento.

INTRODUZIONE

L'affermazione della tecnologia fotovoltaica è strettamente correlata alla riduzione del costo dell'energia prodotta. Per ridurre il costo del kWh prodotto occorre, da un lato, diminuire il costo per unità di potenza installata e, dall'altro, aumentare l'efficienza di conversione. La tecnologia fotovoltaica a concentrazione potrebbe permettere il raggiungimento di tali obiettivi. Differenti studi [1],[2] indicano che il costo dell'energia prodotta da fotovoltaico a concentrazione è fortemente ridotto rispetto ai pannelli piani, soprattutto in quei paesi che hanno un elevato irraggiamento solare per gran parte dell'anno. La riduzione dei costi deriva dalla riduzione della superficie fotovoltaica captante ad alta efficienza e quindi costosa, tramite l'utilizzo di sistemi ottici di concentrazione della radiazione solare [3].

Nell'ambito di questa tematica di ricerca, è stato realizzato un sistema sperimentale innovativo a media concentrazione per la produzione di energia ad alta efficienza da fonte solare.

Nell'apparato sperimentale realizzato, la radiazione solare incidente viene concentrata su una superficie fotovoltaica mediante una serie di specchi piani o a minima curvatura, i quali, opportunamente orientati rispetto al pannello ricevitore, simulano la superficie di un concentratore parabolico (vedi figura 1). Tale soluzione consente una doppia semplificazione sia nella fase di costruzione, sia in quella di funzionamento dell'impianto (in quanto gli specchi presentano un unico asse di rotazione con conseguente semplificazione della movimentazione del sistema).

Un sistema di movimentazione a controllo elettronico ruota gli specchi intorno all'asse di rotazione per fare in modo che i raggi solari vengano sempre concentrati sui pannelli ricettori durante lo spostamento giornaliero del sole.

Il pannello ricevitore è costituito da celle fotovoltaiche tradizionali in silicio policristallino, che costituiscono una tecnologia matura. Le celle in silicio policristallino tollerano livelli di concentrazione dell'ordine di 5-10X, consentendo una notevole riduzione della superficie captante necessaria, mantenendo però i vantaggi di una tecnologia ormai consolidata [4].

Per consentire l'asportazione del calore dovuto al maggior flusso luminoso le celle fotovoltaiche sono collegate ad un profilato alettato.

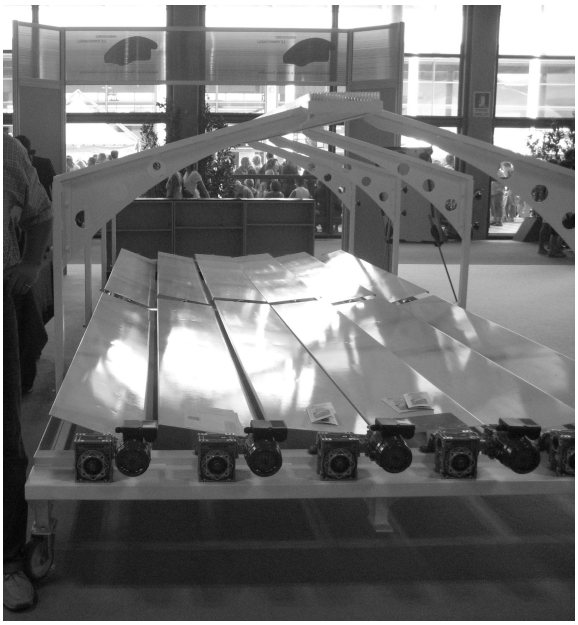


Figura 1: Sistema innovativo sperimentale per fotovoltaico a media concentrazione.

Questa tecnologia presenta vantaggi rispetto ai sistemi fotovoltaici tradizionali piani ed ai sistemi ad alta concentrazione.

Rispetto ai pannelli piani la media concentrazione permette, a parità di energia prodotta, un minor numero di celle fotovoltaiche captanti. Inoltre l'efficienza delle celle fotovoltaiche aumenta all'aumentare dell'irraggiamento a patto che vengano raffreddate [3],[4].

Tramite modellazione al calcolatore si è determinata la configurazione geometrica ottimale al fine di massimizzare la captazione della radiazione incidente (vedi figura 2).

La simulazione tramite calcolatore ha consentito di determinare che:

• l'orientamento ottimale è quello con assi di rotazione in direzione nord-sud,

• lunghezza ottimale degli specchi è pari ad 1,1 volte la lunghezza del pannello in direzione sud. Questo consente di sopperire alle perdite dovute ad un'inclinazione nulla degli specchi rispetto al suolo, guadagnando in semplicità costruttiva;

• larghezza ottimale di ogni singolo specchio è 2 volte la larghezza del pannello;

• il numero di specchi ottimale è 6;

•il valore ottimale dell'altezza del pannello ricettore sopra gli specchi risulta essere 0,5 volte la larghezza totale degli specchi.

Il pannello ricevitore misura 0.18 m in larghezza e 5.4 m in lunghezza, mentre la serie di specchi 2.4 m in larghezza e 6.2 m in lunghezza.

Il pannello ricevitore è costituito da 216 celle in silicio policristallino da 60x60 mm.

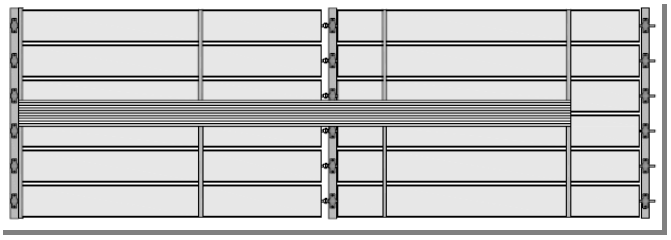


Figura 2: Sistema innovativo sperimentale per fotovoltaico a media concentrazione.

Rispetto ai sistemi fotovoltaici ad alta concentrazione, la media concentrazione permette inoltre l'utilizzo di celle fotovoltaiche tradizionali invece che celle fotovoltaiche multi giunzione particolarmente complesse (tre strati sovrapposti con arseniuro di gallio, silicio e germanio) e quindi molto costose. L'utilizzo di celle fotovoltaiche tradizionali deve prevedere, tuttavia, il superamento della problematica relativa all'asportazione del calore dovuto al maggior flusso luminoso incidente. E' noto, infatti, che l'efficienza della cella diminuisce all'aumentare della sua temperatura.

Nel presente lavoro viene presentato uno studio teorico-sperimentale volto all'individuazione dei campi termici su stringhe di pannelli fotovoltaici a media concentrazione al fine di valutare l'effetto di diverse soluzioni impiantistiche sulla temperatura di esercizio e quindi sul rendimento.

In particolare sono presi in considerazione il caso di convezione forzata con acqua come fluido termovettore e convezione naturale con profilo alettato.

Tramite considerazioni di carattere impiantistico ed economico, si perviene alla scelta del sistema di raffreddamento ottimale per il prototipo sopra descritto.

SCAMBIO TERMICO IN CONVEZIONE FORZATA PER CELLE FOTOVOLTAICHE IN MEDIA CONCENTRAZIONE

Di seguito si analizza lo scambio termico nell'ipotesi di convezione forzata, con acqua come fluido termovettore.

La configurazione geometrica di riferimento è riportata in figura 3. Le celle fotovoltaiche vengono laminate tra due fogli di EVA (etilvinilacetato) e un foglio di isolante elettrico direttamente a contatto con la lamina di alluminio. Questa a sua volta è direttamente in contatto con il fluido termovettore.

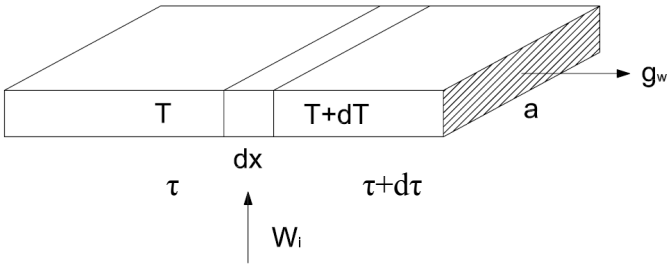


Figura 3: Schema scambio termico.

Lo scambio termico tra celle fotovoltaiche ed acqua è descritto da Eq. (1) e Eq. (2) [5]:

$$W_i \cdot \varepsilon \cdot a \cdot dx = \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot \left(\tau_x^4 - \tau_{mr}^4\right) \cdot a \cdot dx + \\ + H \cdot \left(\tau_x - T_x\right) \cdot a \cdot dx + h \cdot \left(\tau_x - \tau_{est}\right) \cdot a \cdot dx \quad (1)$$

$$g_w \cdot \gamma_w \cdot dT = H \cdot a \cdot dx \cdot \left(\tau_x - T_x\right) \quad (2)$$

Le due equazioni differenziali (1) e (2) vengono discretizzate come in figura 4 nelle Eq. (3) e Eq. (4):

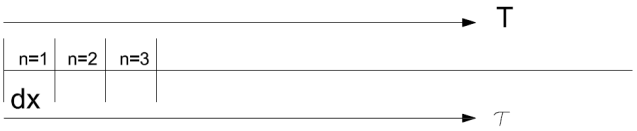


Figura 4: Schema scambio termico discretizzato.

$$W_i \cdot \varepsilon = \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot \left(\tau_n^4 - \tau_{mr}^4\right) + H \cdot \left(\tau_n - T_n\right) + h \cdot \left(\tau_n - \tau_{est}\right) \quad (3)$$

$$g_w \cdot \gamma_w \cdot \left(T_n - T_{n-1}\right) = H \cdot a \cdot \Delta x \cdot \left(\tau_n - T_n\right) \quad (4)$$

La equazione (3) può essere linearizzata ottenendo Eq. (5):

$$W_i \cdot \varepsilon = 4 \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot \tau_{mr}^3 \left(\tau_n - \tau_{mr}\right) + H \cdot \left(\tau_n - T_n\right) + h \cdot \left(\tau_n - \tau_{est}\right) \quad (5)$$

La trasmittanza H è definita in Eq. (6) come segue:

$$H = \frac{1}{R_c + \frac{s_{EVA}}{\lambda_{EVA}} + \frac{s_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{s_a}{\lambda_a} + \frac{1}{h_{\text{int}}}} \quad (6)$$

Nell'Equazione (6) la resistenza di contatto è da considerare pari alla somma delle resistenze di contatto tra i singoli strati.

La valutazione della temperatura delle celle e dell'acqua lungo il collettore viene effettuata impiegando le eq. 4 e 5 in iterazione come riportato schematicamente nella figura 5.

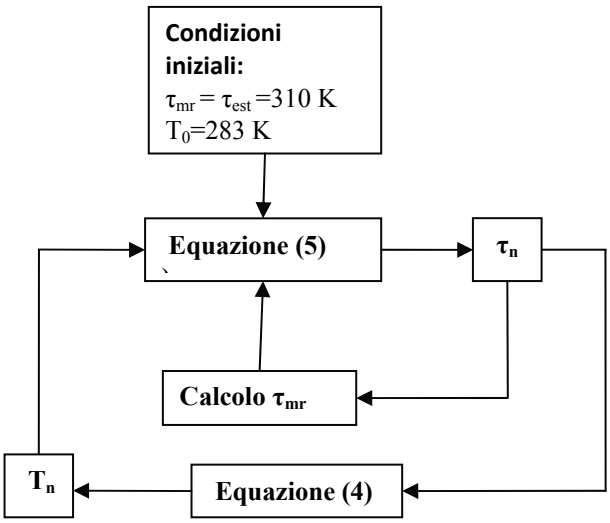


Figura 5: Schema logico del calcolo per la determinazione delle temperature.

L'equazione 2 può essere riscritta nella eq. 7 come:

$$-g_w \cdot \gamma_w \cdot dT_w = H \cdot b \cdot dx \cdot (T_w - T_c) \tag{7}$$

da cui differenziando si ottiene la Eq. 8:

$$\frac{d(T_w - T_c)}{(T_w - T_c)} = -\frac{H \cdot a}{\gamma_w \cdot g_w} \cdot dx \tag{8}$$

Integrando infine la Eq. 8 si ottiene la Eq. 9:

$$(T_w - T_c)_x = (T_w - T_c)_0 \cdot e^{-\frac{H \cdot a}{\gamma_w \cdot g_w} \cdot x} \tag{9}$$

Da cui si ricava l'andamento della temperatura dell'acqua all'interno del collettore, come mostrato in figura 6.

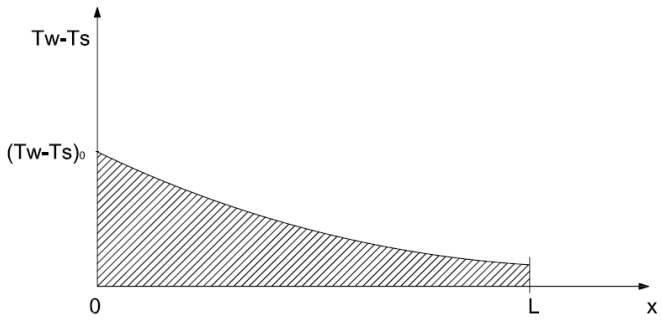


Figura 6: Andamento della temperatura dell'acqua all'interno del collettore.

Per massimizzare l'asportazione del calore dalle celle fotovoltaiche, l'acqua può essere introdotta da entrambe le estremità del collettore e raccolta centralmente, dopo aver effettuato la sottrazione di calore, come mostrato in figura 7.

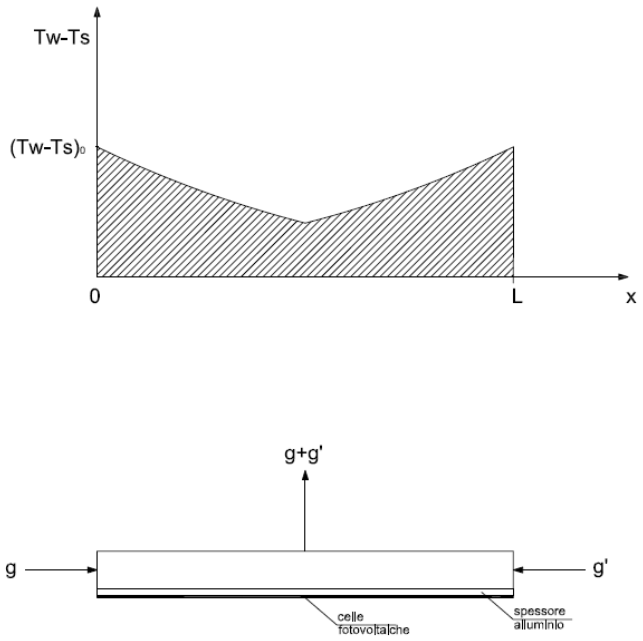


Figura 7: Andamento della temperatura dell'acqua all'interno del collettore nel caso di introduzione di acqua da entrambe le estremità.

Applicazione del modello al prototipo sperimentale

Il modello sopra descritto è stato applicato per calcolare la temperatura raggiunta dalle celle in fase di progettazione al prototipo sperimentale.

Nel calcolo sono stati considerati i seguenti parametri termici e geometrici riportati in tabella 1:

Tabella 1: Parametri termici e geometrici

W_i	6000 [W/m^2]
ε	0.8
σ_0	5.67 ·10^{-8} [W/m^{2}K^4]
h_{int}	400 [W/m^{2}K]
λ_{EVA}	0.041 [W/mK]
s_{EVA}	0.0001 [m]
s_{is}	0.0001 [m]
λ_{is}	0.035 [W/mK]
s_a	0.005 [m]
λ_a	240 [W/mK]
R_p	0.005 [m^{2}K/W]
τ_{est}	310 [K]
τ_{mr}	310 [K]
g_w	0.1 [kg/s]
γ_w	4180 [J/kg]
a	0.18 [m]
L	6 [m]
Δx	0.1 [m]

Inserendo i valori riportati in tabella 1 nelle eq. 4, 5 e 6, il processo di calcolo descritto in figura 5 permette di calcolare l'andamento della temperatura dell'acqua T_n e delle celle τ_n

lungo il collettore. I risultati sono riportati nel grafico di figura 8.

Come mostrato nel grafico, entrambe le temperature aumentano lungo il collettore a causa del progressivo riscaldamento dell'acqua.

Ipotizzando di utilizzare acqua ad una temperatura di ingresso di 10 °C, la temperatura delle celle nella parte finale del collettore raggiunge 70 °C e la temperatura dell'acqua in uscita raggiunge 26 ° C circa.

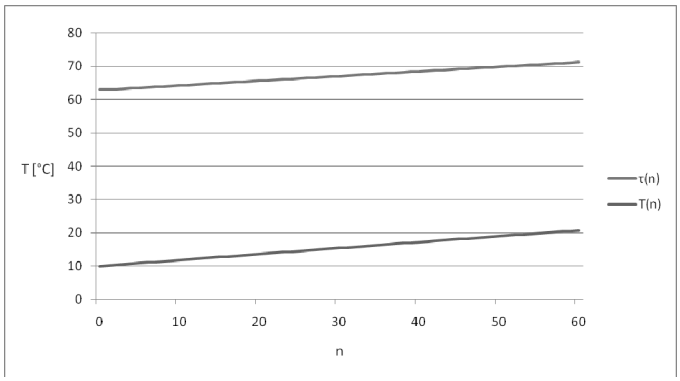


Figura 8: Valori di temperatura dell'acqua e delle celle per il prototipo sperimentale.

La situazione può essere migliorata introducendo doppia portata di acqua fresca da entrambi i lati, come descritto precedentemente in figura 7. La figura 9 mostra l'andamento della temperatura nel caso suddetto.

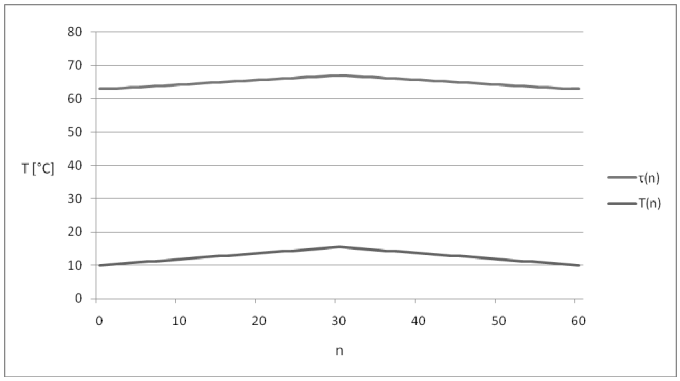


Figura 9: Valori di temperatura dell'acqua e delle celle nel caso di introduzione di doppia portata.

SCAMBIO TERMICO IN CONVEZIONE NATURALE PER CELLE FOTOVOLTAICHE IN MEDIA CONCENTRAZIONE

La configurazione in convezione naturale prevede il raffreddamento delle celle fotovoltaiche tramite profilo alettato in convezione naturale con l'aria.

Di seguito viene determinata la configurazione geometrica ottimale della superficie alettata preposta al raffreddamento della cella. In figura 10 è riportato lo schema della superficie alettata, cui si fa riferimento nei calcoli.

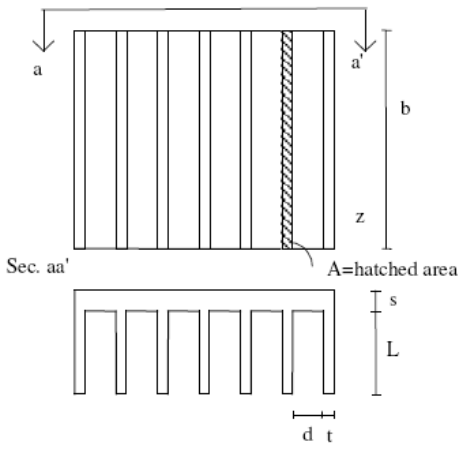


Figura 10: Schema aletta.

Il flusso convettivo trasmesso tramite aletta è definito dalla Eq. (1) [2]:

$$q_c = \frac{2 \cdot (z+d) \cdot L \cdot \lambda_a \cdot (T_p - T_\infty)}{b \cdot \sqrt{\frac{576}{R^2 \left(\frac{d}{b}\right)^4} + \left(\frac{d}{b}\right)^2 \frac{2.873}{\sqrt{R}} + \left(\frac{d}{b}\right) \frac{2\lambda_a L^2}{3\lambda_w t}}} \quad (10)$$

dove

$$R = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot b^3}{\upsilon^2} \cdot \mathrm{Pr} \quad (11)$$

Per definire la configurazione ottimale dell'aletta, vanno determinati i valori di d e l che massimizzano la funzione $q_c(d,l)$ espressa in Eq. (10).

Determinati d e l ottimali, si ricava la trasmittanza totale con Eq. (12):

$$H = \frac{1}{\frac{z \cdot b \cdot \Delta T}{q(d_{ott}, l_{ott})} + \frac{s_a}{\lambda_a}} \quad (12)$$

L'equazione di scambio termico (13) consente infine di calcolare la temperatura delle celle fotovoltaiche in convezione naturale e presenza di superficie alettata:

$$W_i \cdot S_c \cdot \varepsilon - \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot \left(T_c^4 - \tau_{mr}^{\ 4}\right) - H \cdot S_a \cdot \left(T_c - \tau_{est}\right) = 0 \quad (13)$$

Applicazione del modello al prototipo sperimentale

Il modello sopra descritto è stato applicato per calcolare la temperatura raggiunta dalle celle in fase di progettazione al prototipo sperimentale.

Nel calcolo sono stati considerati i seguenti dati termici e geometrici riportati in tabella 2.

Inserendo i parametri riportati in tabella 1 in Eq. 10 e calcolando il massimo della funzione $q_c(d,l)$ [2], sono stati determinati i valori ottimali di *d* e *l*, e quindi la configurazione ottimale dell'aletta. I risultati sono riportati in tabella 3.

Tabella 2: Dati termici e geometrici

a	0.18 [m]
L	5.4 [m]
β	0.00367 [1/K]
t	0.002 [m]
z	0.25 [m]
ν	$1.5 \cdot 10^{-5}$ [m^2/s]
Pr	0.7
ΔT	50 [K]
W_i	6000 [W/m^2]
ε	0.8
σ_0	$5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m^2K^4]
s_a	0.008 [m]
λ_a	240 [W/mK]
λ_{aria}	0.026 [W/mK]
τ_{est}	298 [K]
τ_{mr}	310 [K]
b	5.4 [m]

Tab. 3: Configurazione ottimale aletta.

d_{ott}	0.013 [m]
l_{ott}	0.125 [m]

Tramite Eq. 12 e 13 si calcola la temperatura raggiunta dalle celle, che per i dati geometrici e termici considerati vale:

$$T_c = 335K = 62°C \quad (14)$$

CONCLUSIONI

Dal confronto tra le temperature raggiunte dalle celle fotovoltaiche nei due casi descritti, emerge che il sistema di raffreddamento ottimale per il prototipo sperimentale è quello in convezione naturale.

Considerando infatti che i valori di temperatura raggiunti nei due casi sono praticamente coincidenti, la complicazione costruttiva ed impiantistica che deriva dall'utilizzo di un sistema di scambio termico in convezione forzata non ne giustifica l'impiego.

NOMENCLATURA

Simbolo	Unità	Descrizione
a	m	Larghezza superficie fotovoltaica
b	m	Lunghezza aletta
β	1/K	Coefficiente di dilatazione termica
γ_w	J/kgK	Calore specifico acqua
d	m	Spessore cavità aletta
d_{ott}	m	Spessore ottimale cavità aletta
ΔT	K	Differenza di temperatura tra aria ambiente e aletta
ε		emissività
g	m/s^2	Accelerazione gravità
g_w	Kg/s	Portata acqua
h_{int}	W/m^2K	Coefficiente di convezione
H	W/m^2K	Trasmittanza termica
L	m	Lunghezza superficie fotovoltaica
l	m	Altezza aletta
l_{ott}	m	Altezza aletta ottimale
λ_a	W/mK	Conducibilità termica alluminio
λ_{EVA}	W/mK	Conducibilità termica EVA
λ_{aria}	W/mK	Conducibilità termica aria
λ_{is}	W/mK	Conducibilità termica isolante elettrico
ν	m^2/s	Viscosità cinematica
Pr		Numero di Prandtl
q_c	W	Flusso di calore convettivo
R		Numero di Rayleigh riferito a b
R_c	m^2K/W	Resistenza di contatto
s_a	m	Spessore lamina alluminio
s_{EVA}	m	Spessore strato EVA
s_{is}	m	Spessore strato isolante
S_c	m^2	Superficie celle fotovoltaiche
S_a	m^2	Superficie inferiore aletta a contatto con celle fotovoltaiche
σ_0	W/m^2K^4	Costante di Stefan-Boltzmann
t	m	Spessore singola aletta
T_x	K	Temperatura acqua interno collettore
T_w	K	Temperatura acqua
T_c	K	Temperatura celle fotovoltaiche
τ_x	K	Temperatura celle fotovoltaiche
τ_{mr}	K	Temperatura media radiante
τ_{est}	K	Temperatura aria ambiente
W_i	W/m^2	Potenza incidente su celle fotovoltaiche
z	m	Larghezza aletta

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. R. M. Swanson, The promise of concentrators, *Progr. Photovolt.* 8, 2000, pp.93-111
2. G.R. Whitfield, R.W. Bentley, H.D. Mohring et al., Development and testing of optical concentrators for small PV systems, *Proceedings of the 2nd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion,* 1998, pp. 2181-2183
3. A. Mohr, T. Roth, M. Epmeier, S. W. Glunz, Silicon concentrator cells in an one-axis tracking concentrator system with a concentration ratio of 300x, *Photovoltaic Specialists Conference Record of the Thirty-first IEEE*, 3-7 Jan. 2005, pp. 639 – 642.
4. B. Zinsser, G. Makrides, M. Schubert, G. E. Georghiou and J. Werner, Temperature and Intensity dependence of Twelve Photovoltaic Technologies, *23rd EUPVSEC-33 Conference*, 1-5 September 2008, Valencia.
5. G.Guglielmini, C. Pisoni, Elementi di trasmissione del calore, *Ed. Veschi*, 1990.
6. F. Rossi, M. Filipponi, A. Nicolini, Optimization of spacing for rectangular not-unitary efficiency fin systems, *International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment*, August 20-22,2005, Corfù, Greece.

NUOVO REATTORE SPERIMENTALE PER LA PRODUZIONE DI GAS IDRATI

Federico Rossi[1], Franco Cotana[2], Beatrice Castellani[2], Mirko Filipponi[1]

[1]CIRIAF – Sezione Terni, Località Pentima Bassa,Terni
[2]Centro di Ricerca sulle Biomasse, Via G. Duranti, Perugia

SOMMARIO

La necessità di far fronte all'aumento mondiale dei consumi energetici richiede lo studio e lo sviluppo di tecnologie innovative per il trasporto e lo stoccaggio dei combustibili gassosi, competitive in termini economici e di sicurezza. I clatrati idrati di gas a basso peso molecolare, in forma solida, rappresentano una valida alternativa alle tecnologie di trasporto consolidate (compressione e liquefazione), con particolare riguardo alle applicazioni di piccola e media taglia, per le quali il trasporto in forma liquefatta, più efficiente in termini energetici, risulta essere oneroso a causa dei maggiori costi iniziali di realizzazione. I gas idrati si distinguono dalle altre tecnologie di stoccaggio per le loro caratteristiche di sicurezza, economicità ed eco compatibilità.

Nel presente lavoro la tecnologia basata su gas idrati è stata messa a confronto con le principali modalità di trasporto del metano (compressione e liquefazione), al fine di determinarne la competitività economica.

E' stato inoltre progettato e realizzato un apparato sperimentale per lo studio del processo di formazione dei gas idrati e dei parametri che influiscono sulla cinetica di reazione.

INTRODUZIONE

Gli idrati di gas sono solidi cristallini, costituiti da una molecola di gas circondata da una gabbia di molecole d'acqua (vedi figura 1).

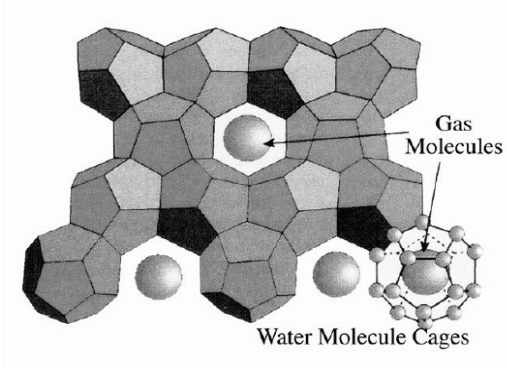


Figura 1: Struttura degli idrati di gas.

La struttura cristallina è composta infatti da poliedri di molecole d'acqua legate tra loro tramite legami idrogeno. I poliedri formano delle gabbie che possono contenere al più una molecola ospite, legata alle molecole d'acqua da forze di Van der Waals. Raramente la gabbia ospita due molecole di gas.

Le gabbie sono organizzate in tre possibili strutture chiamate struttura I (sI), struttura II (sII) e struttura H (sH) come mostrato in figura 2. Il metano forma strutture di tipo sI mentre il gas naturale strutture di tipo sII.

La struttura sI è formata da due celle piccole e sei grandi. La cella piccola ha dodici facce pentagonali con lati e angoli uguali. La gabbia grande ha dodici facce pentagonali e due esagonali. La struttura unitaria sI contiene quindi 46 molecole di acqua e 8 di gas.

La struttura sII è formata da 16 celle piccole e 8 grandi. Anche la sII ha il dodecaedro pentagonale come cella piccola, mentre la cella più grande ha 12 facce pentagonali e 4 esagonali. La struttura unitaria sII contiene quindi 136 molecole di acqua e 24 molecole di gas.

La struttura di tipo H consiste di 34 molecole d'acqua, che formano tre tipi di gabbie, due piccole e di tipo differente ed una grande. Questa struttura riguarda però molecole ospiti di grandi dimensioni.

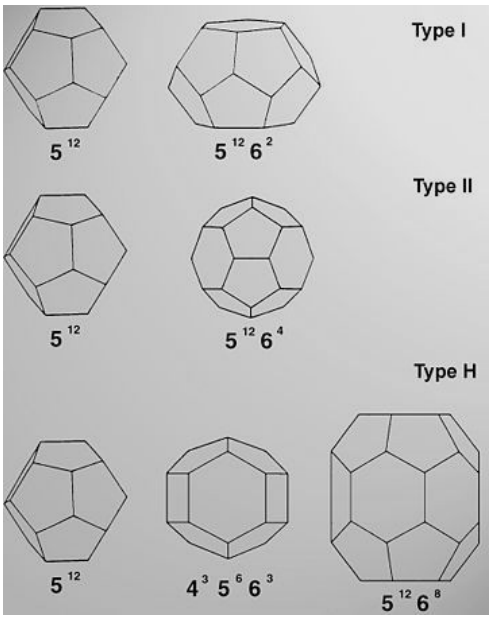


Figura 2: Configurazione geometrica delle gabbie.

Conoscendo la struttura dell'idrato formato da un gas di composizione nota, è possibile calcolare il numero ideale di idratazione, definito come il rapporto tra il numero di molecole d'acqua e il numero di molecole ospiti. Il metano puro occupa le due celle piccole e le sei grandi della struttura sI, quindi con 46 molecole di acqua nella struttura di base, il numero ideale di idratazione diventa 5.75.

Per una miscela di gas naturale di metano, etano e propano, in cui l'etano e il propano stabilizzano le 8 celle grandi della struttura sII, il metano occupa le 16 celle piccole e la struttura base contiene 136 molecole di acqua, il numero ideale di idratazione assume il valore di 5.67.

Se tutte le gabbie della struttura venissero riempite, ogni volume di idrato conterrebbe 182 volumi di gas in condizioni standard. Nella realtà, tuttavia, è impossibile ottenere un cristallo in cui tutte le gabbie siano occupate; il numero reale di idratazione è dunque maggiore di quello ideale (per il metano il numero reale di idratazione è all'incirca 6).

Per la formazione degli idrati sono necessarie alte pressioni e temperature vicine agli 0°C, ma è stato dimostrato che gli idrati di metano si conservanoa pressione atmosferica se mantenuti a temperature di circa -20°C in una cella frigorifera [1].

La tecnologia degli idrati si sta sviluppando con particolare riguardo al cosiddetto "stranded gas". Per "stranded gas" si intende il gas naturale situato lontano da gasdotti già esistenti o comunque riferito a situazioni in cui la costruzione e l'utilizzo di nuovi gasdotti non è economicamente vantaggiosa. Il gas prodotto in siti remoti non viene immesso nei gasdotti per essere inviato ai siti di stoccaggio; per questo, a causa del valore commerciale del gas bloccato, la tecnologia con gas idrati si rivela come la più opportuna per i casi citati [2].

La tecnologia basata su gas idrati costituisce, inoltre, un'efficace soluzione per la filtrazione del metano ottenuto tramite il processo di digestione anaerobica. Poiché questo processo di conversione è solitamente decentrato nelle zone rurali laddove la disponibilità di biomassa è maggiore, i gas idrati rappresentano, alla luce di quanto esposto sopra e riguardo a questa particolare applicazione, una idonea modalità di trasporto.

VALUTAZIONI ENERGETICHE SULLE PRINCIPALI TECNOLOGIE DI STOCCAGGIO DEL METANO

Di seguito si analizzano le principali modalità di immagazzinamento del metano.

Le tecnologie oggetto di studio sono quelle basate su compressione e liquefazione e quella innovativa basata sui clatrati idrati di metano.

Per ciascuna delle diverse soluzioni di stoccaggio, sono stati individuati i valori percentuali in massa di metano rispetto alla massa dell'intero sistema, densità di metano nel sistema ed energia spesa per lo stoccaggio e il ripristino a condizioni di impiego su energia immagazzinata, energia trasportata su peso, energia trasportata su volume.

I parametri sopra elencati sono stati quindi presi a riferimento per confrontare la convenienza energetica delle diverse soluzioni di immagazzinamento e trasporto del metano.

Nel calcolo delle grandezze prese in considerazione per descrivere i diversi sistemi di stoccaggio, sono state formulate delle ipotesi sui processi impiegati [3]-[4]:

- compressioni adiabatiche a singolo stadio senza interrefrigerazioni con rendimento di compressione pari a 0.85;
- assenza di recupero di calore nelle operazioni di compressione;
- assenza di recupero entalpico nell'espansione dei gas.

Il comportamento reale del gas è stato approssimato mediante modelli che impiegano:

- approssimazione di Van der Waals nelle equazioni di stato;
- coefficienti di Langen nei processi di compressione.

Le valutazioni energetiche sono state effettuate facendo riferimento all'insieme metano-sistema di stoccaggio. Ad esempio nel caso di metano compresso, nel computo totale del sistema, oltre al metano si ha anche il contenitore con tutte le conseguenze di peso e volume.

Metano Compresso

Al fine di determinare la reale efficienza dei sistemi di stoccaggio di metano in forma compressa, sono stati messi a confronto gli standard di compressione a 200 bar e 350 bar. Per i due sistemi è stata ricavata la densità netta del gas compresso applicando l'equazione di Van der Waals per i gas reali.

Si è poi calcolata la densità reale del sistema di stoccaggio tenendo conto del peso e del volume del recipiente necessario per il contenimento del gas compresso, considerando peso e ingombro delle classiche bombole in acciaio.

Per il calcolo dell'energia spesa per la compressione, si è proceduto tramite iterazione, utilizzando le Eq. (1) e (2):

$$T_{2s} = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} \tag{1}$$

$$c_P = a + bT_1 \tag{2}$$

Dopo aver determinato la temperatura finale di compressione isoentropica, l'energia spesa è calcolata tramite Eq. (3):

$$\Delta h_{1-2} = \frac{c_{p_{1-2s}}(T_{2s} - T_1)}{\eta_{compr}} \tag{3}$$

Metano liquefatto

Per il calcolo dell'energia spesa per la liquefazione, si fa riferimento ad un ciclo Linde a partire da metano gassoso a 1 bar e 280 K [5].

Le trasformazioni termodinamiche considerate per il processo di rigassificazione sono le seguenti [6]:

- compressione adiabatica irreversibile del liquido tra 1 e 80 bar
- riscaldamento isobaro con acqua di mare fino a 10 °C.

I salti entalpici calcolati sono riportati in tabella 2.2 [6]:

Tab. 1: Salti entalpici per il processo di rigassificazione.

Processo	Δh [kJ/kg]
Compressione	24.9
Vaporizzazione	763.1

Come per il processo di compresssione, anche per il metano liquefatto si è considerata la densità netta del metano liquido e quella del sistema tenendo conto dei sistemi di contenimento.

Tecnologia con gas idrati

La densità dell'idrato di metano è 917 kg/m^3. Se si assume un numero di idratazione pari a 6, in un m^3 di idrato è contenuto un numero di moli di idrato, e quindi di metano, pari a (Eq. 4):

$$n = \frac{917}{PM_{hyd}} = \frac{917}{0.124} = 7395\ .16\ mol \tag{4}$$

Applicando l'equazione dei gas perfetti come in Eq. 5, è possibile calcolare il volume di metano contenuto in un m^3 di idrato quando espande fino alle condizioni standard (15°C e 1 atm):

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{7395\ .16 \cdot 8.314 \cdot 288}{101325} = 174\ .7\ m^3 \tag{5}$$

Per i calcoli si assume la liberazione di 175 Sm^3 di metano da un m^3 di idrato.

Per ottenere l'entalpia di formazione in termini di kJ/kg, ipotizzando che essa avvenga in un reattore alla temperatura di 2°C, si calcola l'entalpia di dissociazione con la Eq. 6 [7]:

$$\Delta h_{diss} = 4.18\,(13500 - 4T) = 51.8\,kJ\ /\ mol \tag{6}$$

Questo rappresenta il calore liberato dalle reazioni di formazione, che va sottratto per mantenere il reattore alla temperatura di esercizio.

L'entalpia di dissociazione è ricavata da [8].

Risultati e considerazioni

Nella tabella 2 e nella tabella 3 sono riportati i risultati dei calcoli svolti. In particolare nella tabella 2 sono riportate le grandezze fisico-chimiche quali:

- temperatura a cui è stoccato CH_4;
- pressione a cui è stoccato CH_4;
- densità netta del CH_4 stoccato;
- densità del sistema (CH_4+vettore+recipiente);
- peso del CH_4 immagazzinato su peso del sistema.

Tab. 2: Proprietà chimico-fisiche dei diversi sistemi di stoccaggio

Proprietà chimico-fisiche	T [K]	P [bar]	Densità Netta [kg/m3]	Densità Sistema [kg/m3]	Peso CH4/Peso sist.
CNG200	288	200	165.6	852.4	0.14
CNG350	288	350	216.4	496.5	0.17
LNG	112	1	422.6	612.1	0.29
HydrCH4	253	1	121	917*	0.13*

(*) Nel calcolo della massa complessiva del sistema non si è tenuto conto del recipiente che contiene il vettore per mancanza di dati relativi allo stesso.

Nella Tabella 3 sono invece riportate le grandezze che caratterizzano il sistema e i processi da un punto di vista energetico:

- energia necessaria per sintetizzare il binomio vettore o per comprimere o liquefare il gas;
- energia necessaria per il ripristino fino a condizioni di impiego del CH_4 immagazzinato;
- energia spesa su energia immagazzinata;
- energia trasportata sotto forma di CH_4 su peso del sistema necessaria a trasportare il CH_4 stesso;
- energia trasportata sotto forma di CH_4 su volume del sistema necessaria a trasportare il CH_4 stesso.

Tab. 3: Proprietà energetiche dei diversi sistemi di stoccaggio

Proprietà Energetiche	Esintesi [kJ/kg]	Erilascio [kJ/kg]	Espesa/ Eimmag	Etrasp/peso [kWh/kg]	Etrasp/vol. [kWh/m3]
CNG200	2073	-	0.046	2	1656
CNG350	2492	-	0.055	2.12	2437
LNG	4871	788	0.126	3.62	2789
HydrCH4	417.7	139.5	0.095	1.91	1745

Di seguito nelle figure 3, 4, 5 sono illustrati i grafici dei risultati più significativi.

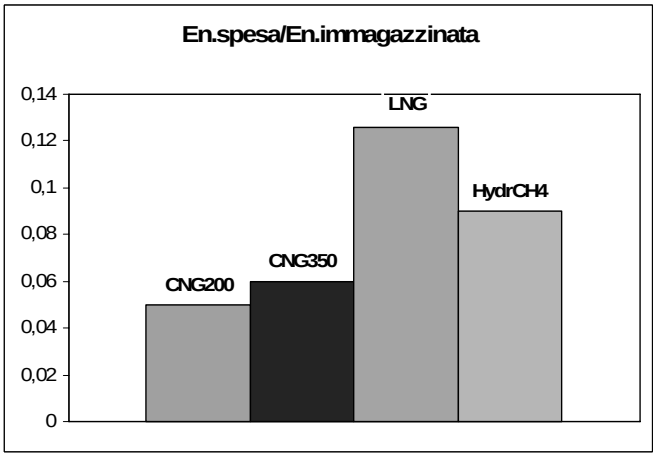


Fig. 3: Confronto tra i valori assunti dal rapporto energia spesa su energia immagazzinata.

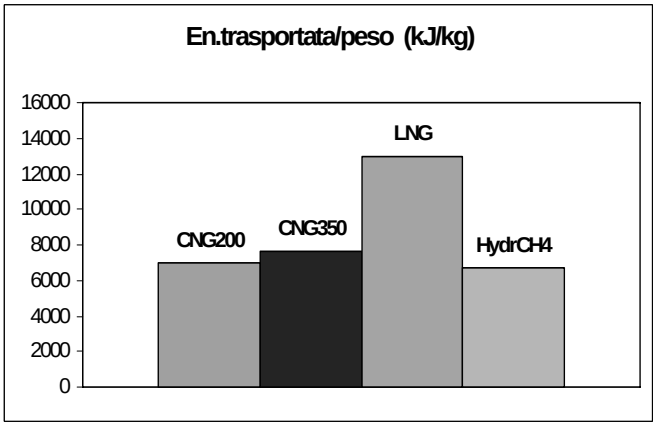


Fig. 4: Confronto tra i valori assunti dal rapporto energia trasportata su peso.

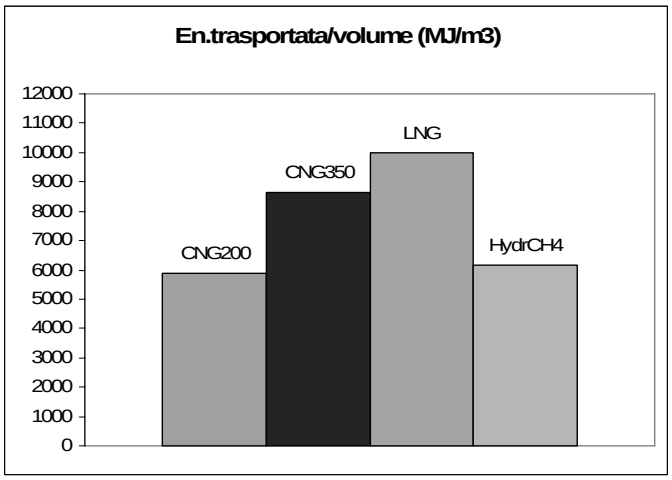


Fig. 5: Confronto tra i valori assunti dal rapporto energia trasportata su volume.

Dall'analisi dei parametri considerati si evince che gli idrati di metano costituiscono un sistema innovativo competitivo con i sistemi tradizionali, in particolare con il sistema di stoccaggio in forma compressa.

Il trasporto tramite gas idrati è meno efficiente in termini energetici rispetto al trasporto in forma liquefatta; tuttavia, considerando le diverse temperature di stoccaggio, il sistema di produzione per gli idrati di metano presenta costi di impianto più contenuti rispetto al sistema di produzione del metano liquefatto [9].

Ne deriva, quindi, che la tecnologia basata su gas idrati si presenta vantaggiosa nelle applicazioni di piccola taglia, per le quali la liquefazione diventa un processo oneroso.

I gas idrati si distinguono inoltre dai tradizionali sistemi di stoccaggio del metano per le loro caratteristiche di sicurezza, poiché trasportati a pressione atmosferica e per il bassissimo rischio di formazione di miscele esplosive, grazie alla elevata stabilità alle temperature di trasporto.

E' stato dimostrato infatti che la dissociazione, e quindi il rischio di formazione di miscela esplosiva, è minima se l'idrato viene trasportato a -20°C [9].

Si sottolinea che il presente studio non prende in considerazione i costi dei materiali di stoccaggio e la loro disponibilità in vista dell'uso su larga scala.

REALIZZAZIONE DEL REATTORE SPERIMENTALE

Poiché la cinetica di reazione e gli effetti prodotti dalle condizioni di pressione e temperatura sul tasso di formazione del gas idrato sono ancora oggetto di studio, è stato realizzato un reattore sperimentale per lo studio del processo di formazione dei gas idrati.

Condizioni di equilibrio

La determinazione delle condizioni di esercizio del reattore si basa sullo studio delle condizioni di equilibrio dell'idrato. Nelle condizioni di equilibrio, il solido idrato coesiste con acqua liquida o ghiaccio, gas ed eventuali additivi. Le condizioni di temperatura e pressione sono definite dalla curva di equilibrio. Gli idrati possono formarsi a temperature inferiori alla temperatura di equilibrio e contemporaneamente a pressione superiore a quella di equilibrio. La distanza dalle condizioni di equilibrio costituisce la *driving force* per la formazione dell'idrato.

La curva di equilibrio dell'idrato rappresenta le condizioni di temperatura e pressione in corrispondenza delle quali si ha dissociazione dell'idrato, con conseguente liberazione di gas.

Per il sistema acqua-gas puro a 273K l'idrato si forma a più di 2,6 MPa. Nella gamma di temperature tra 260 e 273K (ghiaccio), la curva di equilibrio p-T per la formazione del metano idrato può essere rappresentata da Eq. (7) [10]:

$$\ln P = 8.968 - 2196.62 / T \quad (7)$$

Per la gamma di temperature tra 273 e 285 K può essere applicata Eq. (8):

$$\ln P = 29.112 - 7694.3 / T \quad (8)$$

La temperatura di equilibrio a 1 atm è -73°C per il gas metano e -36°C per il gas naturale. A queste temperature gli idrati sono termodinamicamente stabili.

La concentrazione del gas in idrato rimane tuttavia quasi invariata se quest'ultimo viene conservato a pressione atmosferica ed a -18 ° C per un periodo di 10 giorni, grazie alla formazione di uno strato di ghiaccio intorno ai cristalli di struttura [10]. Questo effetto di auto-conservazione viene utilizzato proprio nei processi di produzione degli idrati per lo stoccaggio di metano alla pressione atmosferica.

Le condizioni di formazione dell'idrato non corrispondono inoltre alle condizioni di dissociazione a causa dell'effetto cinetico di sottoraffreddamento necessari per l'avviamento della crescita del cristallo. Normalmente questo effetto non supera gli 1.5-2 K. L'aggiunta di sali all'acqua eleva la pressione di formazione, mentre l'aggiunta di gas di idrocarburi, biossido di carbonio e idrogeno solforato al metano la diminuisce.

Nella figura 6 è riportata la curva di equilibrio per gli idrati di metano.

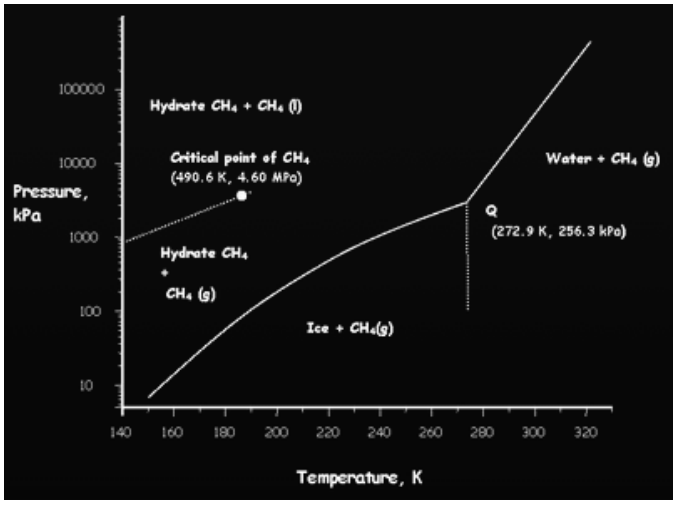


Figura 6: Struttura degli idrati di gas.

Dimensionamento del reattore sperimentale

Il corpo principale del reattore è stato dimensionato per resistere a pressioni di esercizio fino a 120 bar. La figura 7 rappresenta il recipiente durante la fase di lavorazione.

In figura è visibile inoltre la flangia di scarico per la raccolta del gas idrato prodotto.

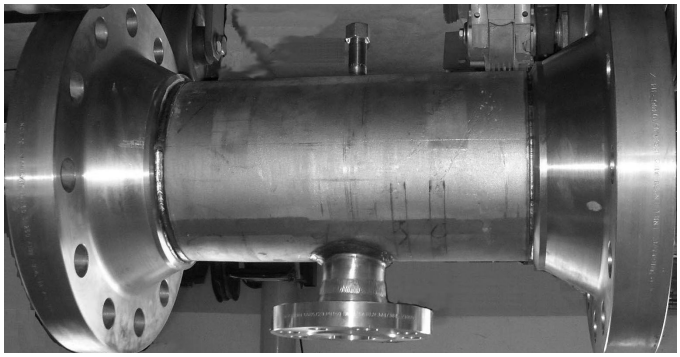


Figura 7: Recipiente in pressione per apparato sperimentale.

Al recipiente in pressione vengono applicati il circuito di alimentazione e nebulizzazione dell'acqua, di alimentazione del gas ed il sistema di raccolta dell'idrato, come mostrato in figura 8. Il sistema di alimentazione dell'acqua, in particolare, è composto dal sistema di pressurizzazione tramite azoto e dal collettore di distribuzione su cui sono montati gli appositi ugelli.

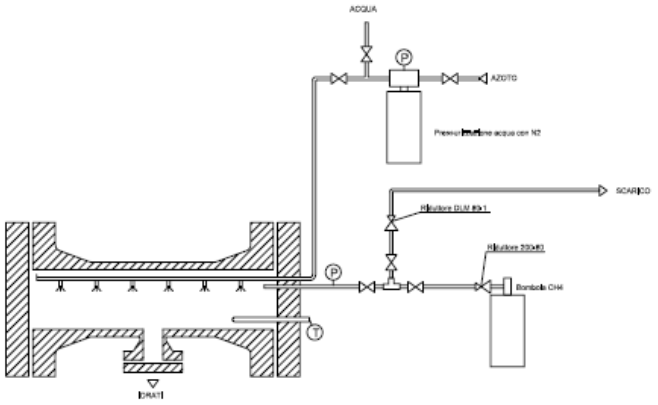


Figura 8: Circuito di alimentazione gas-acqua.

L'apparato sperimentale realizza infatti l'iniezione di acqua finemente nebulizzata all'interno del recipiente contenente gas alla pressione stabilita. La nebulizzazione dell'acqua è realizzata tramite atomizzatori idraulici, montati sul collettore di mandata dell'acqua all'interno del reattore.

Questa soluzione progettuale permette di massimizzare la superficie di interfaccia gas-liquido e quindi di favorire la reazione di sintesi.

La temperatura di esercizio è determinata tramite la curva di equilibrio, prevedendo un ΔT di sottoraffreddamento di qualche grado.

Il contenitore in pressione è dotato di un sistema di raffreddamento a serpentina per la sottrazione del calore prodotto dalla reazione di formazione dell'idrato.

Il reattore è inoltre dotato di un albero rotante a palettatura variabile. L'altezza delle pale, in particolare, aumenta dall'esterno verso il centro del reattore. La palettatura è tangente al sistema di raccolta costituito da una retina finemente forata che convoglia l'idrato solido alla flangia di raccolta (vedi figure 9 e 10).

La palettatura svolge la duplice funzione di miscelare le due fasi reagenti al fine di massimizzare la superficie di interfaccia gas-liquido e di convogliare il prodotto solido alla flangia di raccolta.

La retina forata permette inoltre una prima fase di separazione dell'idrato solido dall'acqua liquida, poiché non tutta l'acqua nebulizzata prenderà parte alla reazione.

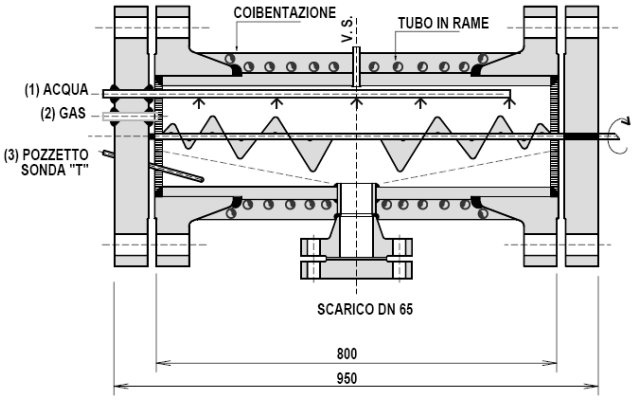


Figura 9: Dettagli costruttivi del reattore per gas idrati.

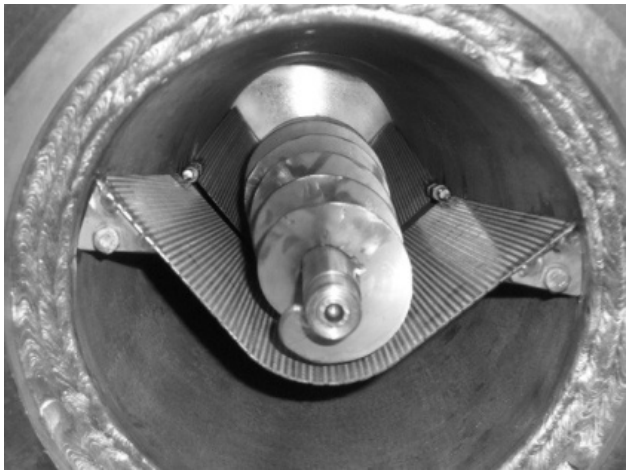


Figura 10: Palettatura e sistema di raccolta degli idrati prodotti.

La formazione dell'idrato viene realizzata mediante la seguente procedura:

- introduzione del metano all'interno del reattore fino alla pressione stabilita;
- raffreddamento del reattore alla temperatura calcolata secondo Eq. (8);
- iniezione di acqua nebulizzata tramite ugelli.

In figura 11 è rappresentato l'apparato sperimentale completato.

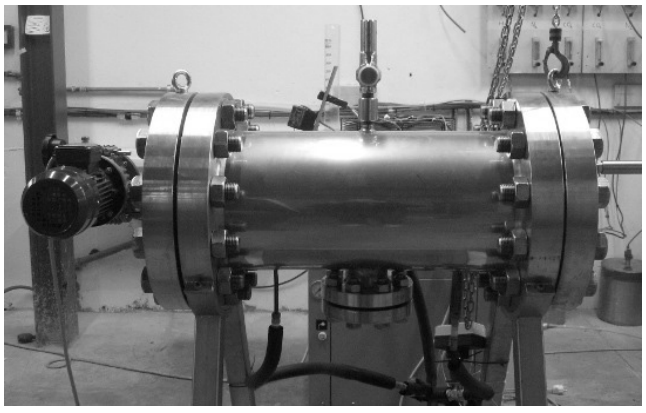


Figura 11: Apparato sperimentale per produzione gas idrati.

SVILUPPI FUTURI

Verranno indagati i valori di pressione e temperatura e le loro variazioni durante i processi di diffusione del gas nel liquido e di formazione del prodotto idrato, con l'obiettivo di abbassare la pressione di formazione, tramite anche la sperimentazione di catalizzatori.

La temperatura riveste un ruolo fondamentale nel processo di formazione, in particolare è emerso che il ΔT di sottoraffreddamento rispetto alle condizioni di equilibrio funge da driving force per il processo stesso [11]. Verrà quindi indagato anche questo parametro.

Un ulteriore parametro che verrà ottimizzato è il diametro medio delle gocce nebulizzate, poiché da questo parametro dipende la superficie di interfaccia gas-liquido e quindi la diffusione del gas nella fase liquida.

Una problematica di fondamentale importanza risiede nel fatto che il prodotto di sintesi contiene oltre al gas idrato, anche acqua in fase liquida e metano in fase gassosa, per cui è necessario prevedere una ulteriore fase di separazione, al fine di ottenere idrato concentrato.

Verrà quindi studiata, in una seconda fase, la possibilità di convertire il reattore batch in continuo, e collegarlo ad un sistema di produzione dell'idrato concentrato. Questo sistema verrà suddiviso in due dispositivi:

1) il primo per l'eliminazione del gas, che consiste in un ciclone, che agisce grazie ai diversi pesi specifici delle tre fasi.

2)il secondo per l'eliminazione dell'acqua a pressione, del tipo a centrifuga. All'interno del contenitore, la cui parete ha una struttura a maglia, viene posto in rotazione un asse a coclea. L'idrato immesso viene spinto verso l'asse grazie alla rotazione stessa, e contemporaneamente separato dall'acqua.

NOMENCLATURA

P = pressione (MPa),
T = temperatura (K).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Gudmundsson J.S., Parlaktuna M. and Khokhar A.A., Storage of Natural Gas as Frozen Hydrate, *SPE 67th Annual technical Conference & Exhibition*, SPE paper 24924, Washington D.C., USA, October 4-7, 1992.
2. Gudmundsson J.S., Graff O.F., Hove A.M. and Laading G., Natural gas hydrate (NGH) technology for stranded gas, *IBC Remote Gas Utilization,* London, U.K., December 1, 1999.
3. Felli M., Lezioni di Fisica Tecnica, Volume Primo, pag. 67-70, 1998.
4. Stecco S., Impianti di Conversione Energetica, 1991.
5. S. Arca, F. Cotana, F.Rossi, P. Di Profio, R. Germani, G. Savelli, M. Amantini, Valutazioni energetiche ed economiche sulle varie tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno, *7° Congresso Nazionale CIRIAF*, Perugia 30/31 marzo, 2007.
6. Cotana F., Pispola G., Recupero di energia mediante espansione diretta dal processo di rigassificazione del gas naturale liquefatto, *Atti del 5° Convegno Nazionale CIRIAF*, Perugia, 8-9 aprile, 2005.
7. Holder, G., Zetts, S. and Pradhan, N., Phase behaviour in systems containing clathrate hydrates, A Review,1988.
8. Anderson G.K., Enthalpy of dissociation and hydration number of methane hydrate from the Clapeyron equation, 2004.
9. Ota S. Kawano H. Hirai K. Kamei M., Concept and Features of Natural Gas Hydrate Pellet Carriers, Ocean '04 MTTS/IEEE Techno-ocean '04, vol. 2, pp.1115-1120, 2004.
10. Yakushev V.S. and Istomin V.A., Gas-Hydrates Self-Preservation Effect, *Physics and Chemistry of Ice*, ed. N. Maeno and T. Hondoh, pp.136-139, Hokkaido University Press, Sapporo, 1992.
11. Vysniauskas A. and Bishnoi P. R., A kinetic study of methane hydrate formation, *Chem. Eng. Sci. 38*, pp. 1061-1072,1983.

PIANIFICAZIONE ECONOMICO-FINANZIARIA DI IMPIANTI A BIOMASSA

Matteo Versiglioni [1], Franco Cotana [2], Gianluca Cavalaglio[2], Filippo Riccardi [1]

[1]Santucci & Partners, Via V.E. Orlando n° 8, Perugia, [2]Centro Ricerca Biomasse, Via G. Duranti, Perugia
filippo.riccardi@santuccipartners.it, cotana@crbnet.it, cavalaglio@crbnet.it

SOMMARIO

Dal punto di vista tecnologico gli impianti di produzione di energia da biomassa sono oggi ben maturi sia dal punto di vista dell'affidabilità sia da quello dell'ottimizzazione dei rendimenti energetici. Vi sono invece problematiche di carattere economico non del tutto risolte, relative alle modalità di sostenimento dell'investimento ed in particolare all'ottimizzazione della struttura delle fonti di finanziamento rispetto al piano economico-finanziario del progetto e compatibilmente con i vincoli posti dai meccanismi di incentivazione. Da un lato infatti gli impianti a biomassa consentono di prevedere una produzione di cassa che dipende dalla tecnologia adottata e dal costo della materia prima; dall'altro la normativa pone a carico di chi voglia beneficiare dei "certificati verdi" o della "tariffa onnicomprensiva" una serie di vincoli relativi proprio alle modalità di finanziamento del progetto. La struttura finanziaria scelta deve quindi tenere in considerazione entrambi gli aspetti citati.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di individuare la struttura finanziaria ottimale in funzione dei flussi di cassa prodotti da impianti di cogenerazione a biomassa, pervenendo ad un modello di valutazione applicabile ad una molteplicità di casi. Lo studio si completa con l'applicazione del modello stesso a tre casi di impianti a biomassa di differenti dimensioni e caratteristiche tecnologiche, valutando di volta in volta lo strumento finanziario più adatto.

INTRODUZIONE

L'analisi finanziaria dei progetti di investimento consta di molteplici aspetti, tutti parimenti rilevanti al fine di determinare se e quanto l'investimento stesso possa essere considerato remunerativo. In particolare due aspetti risultano particolarmente rilevanti: il rendimento atteso e le modalità di finanziamento del progetto.

Il rendimento atteso di un investimento può essere quantificato attraverso l'uso di molteplici strumenti e metodologie di misura. Il fine è, in ogni caso, quello di determinare la redditività del progetto, che si può manifestare come una o più entrate effettive e, in questo caso, l'investimento analizzato può essere confrontato con un ventaglio di progetti alternativi. La redditività si può altresì misurare in termini di risparmi generati [1].

Un secondo aspetto valutato nell'ambito dell'analisi finanziaria del progetto afferisce alle modalità di finanziamento dello stesso. Si procede sostanzialmente a determinare quali siano le fonti da attivare a copertura degli impieghi essendo, questi ultimi, costituiti dall'entità dell'investimento stesso. Le fonti di finanziamento attivabili possono essere di varia natura, tuttavia esse afferiscono principalmente, al Debito (D), da un lato e, dall'altro, al capitale proprio o Equity (E). L'entità totale delle fonti di finanziamento da attivare è necessariamente pari all'entità totale degli impieghi. Il mix di fonti da finanziamento da utilizzare costituisce la "struttura finanziaria" dell'operazione [2].

E' appena il caso di ricordare che le differenze sostanziali tra tali due mezzi di finanziamento afferiscono alla rischiosità ed al costo degli stessi. Il Debito è relativamente poco costoso, ma determina una maggiore rischiosità legata al fatto che, alle scadenze prestabilite, esso deve essere rimborsato e remunerato indipendentemente dai risultati aziendali. L'Equity, invece, è tendenzialmente più costoso ma comporta una minore rischiosità legata al fatto che il suo rimborso e la sua remunerazione sono solo eventuali, e sono legati ai risultati aziendali.

L'analisi finanziaria di un progetto consiste quindi, nella determinazione di una struttura finanziaria (mix di Debito ed Equity) adatta allo specifico investimento, alla rischiosità dello stesso, al suo rendimento atteso ed ai flussi di liquidità che esso genera. Per ogni investimento dunque, l'analisi finanziaria determina il mix ottimale tra Debito ed Equity.

Rimane necessario evidenziare come un'accurata determinazione dei dati di input, sia economici che tecnologici, ha un rilevante impatto nella costruzione dei flussi di cassa e di conseguenza, nella valutazione delle strutture ottimali di finanziamento. Il presente studio ha l'obiettivo di presentare una procedura metodologica in grado di portare alla selezione delle fonti finanziarie preferibili per sostenere investimenti in impianti a biomassa.

IL FONDO ROTATIVO KYOTO

Nel panorama delle modalità di finanziamento di impianti a biomassa, oltre ai tradizionali strumenti di Debito ed Equity, vi è oggi uno strumento che presenta peculiari caratteristiche in termini economici e finanziari. Si tratta dei finanziamenti erogabili da parte del Ministero della Agricoltura e Tutela del Territorio e del Mare (MATT) a valere sul Fondo Rotativo Kyoto.

Tale Fondo, istituito con Decreto del 25.11.2008 [3], fa seguito alla Legge n. 296 del 27.12.2006 che, al comma 1110, ha istituito un apposito Fondo Rotativo per il finanziamento delle misure finalizzate all'attuazione del

Protocollo di Kyoto [4] e, al comma 1111, prevedeva l'adozione, da parte del MATT, di concerto con il Ministro dello Sviluppo Economico, di un decreto per l'individuazione delle modalità di erogazione dei finanziamenti da concedersi a valere sulle risorse del Fondo Kyoto. Il Decreto qui commentato costituisce quindi l'adempimento, da parte del MATT, di tale norma.

I finanziamenti erogati nell'ambito del Fondo possono coprire un massimo del 70% del costo totale dell'investimento, devono essere rimborsati in rate semestrali in un periodo massimo di sei anni e sono remunerati ad un tasso dello 0,5%. Le caratteristiche più rilevanti quindi, afferiscono da un lato alla bassa onerosità del finanziamento e, dall'altro alla rapidità del rimborso costituendo il primo un evidente vantaggio economico ed il secondo una palese criticità finanziaria. Il finanziamento della durata di sei anni, infatti, va coordinato con progetti della durata media di 15 anni.

Ad ogni modo si ritiene che i finanziamenti a valere sul Fondo Kyoto costituiscono, a pieno titolo, una terza tipologia di finanziamento, alternativa a quello sopra commentate di Debito ed Equity.

L'analisi della struttura finanziaria di conseguenza si arricchisce di una terza variabile e la sua completa analisi deve pertanto determinare il mix ottimale tra Debito (D), Equity (E) e Fondo Kyoto (K).

In tale contesto si è ipotizzato che le principali caratteristiche delle tre tipologie di fonti finanziarie siano quelle riportate in tabella 1. In relazione al costo si tenga conto che, per Debito ed Equity, esso cresce al crescere del livello di indebitamento rappresentato dal rapporto (D+K)/(D+K+E). Tale dinamica è riportata in Figura 1.

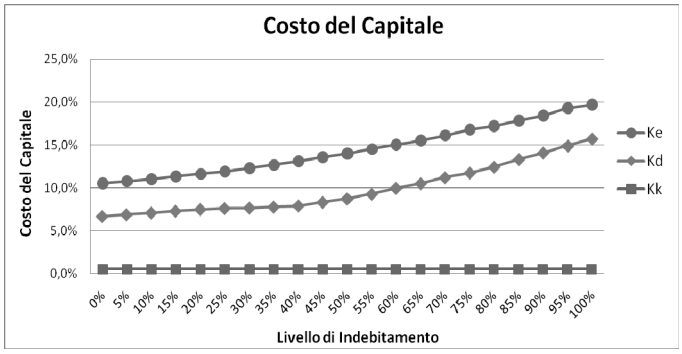


Figura 1: andamento costo di Debito (Kd), Equity (Ke) e Kyoto (Kk)

I dati di cui alla Tabella 1 evidenziano innanzitutto le caratteristiche del fondo Kyoto. Tale modalità di finanziamento risulta poco onerosa in termini di interessi passivi (0,5% con evidenti benefici di conto economico) e tuttavia manifesta tempi di rientro estremamente brevi, se comparati con la durata quindicennale dell'investimento, generando di conseguenza criticità finanziarie.

Il finanziamento bancario viceversa presenta tempi di rimborso potenzialmente coerenti con la durata dell'investimento, ma sconta un costo nettamente superiore (minimo 6,62%).

L'Equity presenta strutturalmente un costo superiore e ne è stata ipotizzata una remunerazione minima del 10.5% in coerenza con la natura dello stesso e tenendo conto della remunerazione di investimenti alternativi con lo stesso profilo di rischio.

Nei paragrafi successivi si è proceduto ad analizzare tre progetti di impianti a biomasse aventi differenti caratteristiche, per poi determinarne la possibile struttura finanziaria in termini di mix Debito/Equity/Kyoto.

Tabella 1: caratteristiche tecniche delle fonti finanziarie

CARATTERISTICHE	COSTO MINIMO	DURATA RIMBORSO
Debito bancario	6,62%	15 anni
Equity	10,5%	N.S.
Debito Kyoto	0,5%	6 anni

GLI IMPIANTI ANALIZZATI – CARATTERISTICHE TECNICHE ED ECONOMICHE

Le caratteristiche tecniche dei tre impianti

Sono stati analizzati tre differenti impianti al fine di sperimentare l'analisi finanziaria della struttura delle fonti sugli stessi. Il primo è un impianto a combustione di piccole dimensioni, costituito da una caldaia e da una turbina, in grado di produrre una potenza elettrica di 0,06 MW ed una potenza termica di 0,4 MW. Il secondo è un impianto di combustione del syngas generato dalla gassificazione del cippato della potenza elettrica di 0,5 MW e con una potenza termica di 0,48 MW. Il terzo è un impianto di grandi dimensioni, costituito da due distinte centrali, che, attraverso un processo di combustione ed espansione in turbina, sviluppa una potenza elettrica totale di 2 MW ed una potenza termica totale di 3 MW. In Tabella 2 si riportano le principali caratteristiche tecniche dei tre impianti.

Tabella 2: caratteristiche tecniche degli impianti

CARATTERISTICHE	IMPIANTO PICCOLO	IMPIANTO MEDIO	IMPIANTO GRANDE
Potenza elettrica (MW)	0,06	0,5	2
Ore funzionamento	7.920	7.920	7.920
KWh elettrici netti prodotti	446,7	3.722,4	14.889,6
Potenza termica (MW)	0,4	0,48	12
Ore funzionamento	4.000	4.000	3.000
KWh termici utilizzati	800	1.920	9.000
Fabbisogno input termico (MWh)	4.752	15.231	88.000
Potere calorifico cippato (KWh/Kg)	4	3,5	2,93
Fabbisogno cippato (Ton/Anno)	1.188	4.352	30.034

L'analisi sopra riportata, oltre ad essere una necessaria analisi tecnica degli impianti stessi, costituisce la base per determinare due fondamentali voci economiche. Da un lato infatti, è possibile determinare il livello dei ricavi producibili moltiplicando le produzioni annue di elettricità e calore per i relativi prezzi. In tale ambito, quanto all'energia elettrica, si è

utilizzato come prezzo, quello di 0,28 €/KWh pari alla Tariffa Omnicomprensiva (impianti di potenza inferiore ad 1 MW).

D'altro lato il fabbisogno di cippato sopra determinato consente di determinare il costo annuo della materia prima, moltiplicando la quantità sopra rilevata per il costo del cippato che è stato stimato per l'attuale analisi, in 54,17 €/ton (corrispondente a 65 €/ton comprensivi di Iva).

Nell'ambito dell'analisi economica e finanziaria degli impianti riportata nei capitoli successivi, si è proceduto a valutare tra l'altro, la capacità degli impianti stessi di sostenere variazioni di prezzo del cippato. In altri termini, una volta valutata la struttura finanziaria in termini di Debito (D), Equity (E) e Fondo di Kyoto (K), si è valutato quanto tale struttura sia in grado di sostenere eventuali variazioni di prezzo del cippato.

Le dimensioni degli investimenti

Al fine di proseguire l'analisi economica degli investimenti sopra introdotti (e determinarne le ottimali strutture finanziarie) è necessario inoltre, rilevare quale sia il costo degli stessi. Tale parametro infatti, determina l'impiego di risorse necessari e quindi, il totale delle fonti di finanziamento da attivare. In secondo luogo l'importo dell'investimento, insieme alla relativa durata, determina gli ammortamenti annui da sostenere e pertanto, una prima rilevante voce di conto economico. In Tabella 3 si riporta l'importo degli investimenti sopra descritti.

Tabella 3: costo degli investimenti ed ammortamenti

CARATTERISTICHE	IMPIANTO PICCOLO	IMPIANTO MEDIO	IMPIANTO GRANDE
Opere Edili	30.000	200.000	500.000
Sistema Produzione Energia	320.000	2.500.000	10.000.000
Impiantistica	60.000	450.000	3.550.000
Progettazione, Direzione Lavori, Assicurazione Progetti	32.800	252.000	450.000
TOTALE	442.800	3.402.000	14.500.000
Numero di anni di esercizio	15	15	15
Ammortamenti annui	29.520	226.800	966.667

Ipotizzando una durata dell'investimento di 15 anni, come riportato nell'ultima riga della tabella sopra elaborata, si sono determinati i livelli degli ammortamenti annui che debbono gravare sul conto economico delle singole iniziative.

Le caratteristiche economiche degli impianti

Oltre a determinare i livelli dei ricavi, dei costi della materia prima (cippato) e l'onere relativo agli ammortamenti, al fine di determinare la redditività dei progetti è stato necessario stimare i costi di gestione degli impianti stessi. Si è quindi proceduto nei tre casi analizzati, a determinare tutti gli altri costi il cui sostenimento risulta necessario per il corretto funzionamento (tabella 4). Ai fini di una completa lettura della tabella si evidenzia che, nel calcolo del piccolo impianto, coerentemente con il fatto che lo stesso è tendenzialmente costruito ed utilizzato presso l'impresa che poi lo gestisce, si è ritenuto di non conteggiare oneri per affitti passivi.

Le manutenzioni sono state ipotizzate costanti in quanto fra esse sono comprese le manutenzioni ordinarie che mantengono uno stesso valore nei diversi anni. Dall'altro vi sono manutenzioni straordinarie le quali, per loro natura, debbono essere capitalizzate e la cui incidenza annua può a sua volta considerarsi non variabile.

Tabella 4: altri costi di gestione degli impianti

CARATTERISTICHE	IMPIANTO PICCOLO	IMPIANTO MEDIO	IMPIANTO GRANDE
Altre materie prime (Diesel/Biodiesel)	0	121.333	0
Oneri del personale	20.000	80.000	240.000
Manutenzioni ordinarie	3.750	30.000	150.000
Manutenzioni straordinarie	6.250	43.000	250.000
Affitti passivi	0	57.000	0
Oneri di smaltimento	0	48.000	0
Altri materiali	3.500	20.000	60.000
Costi amministrativi	1.000	10.000	25.000

Risultati economici e finanziari

Sulla base dei dati di input sopra esposti, coerentemente con le finalità del presente lavoro, si è proceduto a strutturare per i tre impianti, dei conti economici previsionali (sui 16 anni relativi alla costruzione, messa in funzione e gestione dell'impianto). Ciò ha consentito di analizzare la redditività degli investimenti.

In Tabella 5 si sono riportati i principali indicatori in termini di risultati economici. I risultati riportati afferiscono al Reddito Operativo che costituisce il risultato economico prima di sostenere gli oneri finanziari il cui importo (essendo legato alla struttura finanziaria scelta e, nello specifico alla quantità e qualità di debito) dipende dal mix di fonti analizzato nel prosieguo. Il risultato riportato inoltre, è quello riferito agli anni di gestione successivi al secondo periodo dal quale tale redditività è costante.

Questo parametro di redditività costituisce il dato di base per determinare la struttura finanziaria ottimale del progetto. La Redditività Operativa infatti, costituisce la risorsa necessaria alla remunerazione delle fonti di finanziamento (interessi per Debito e Fondo Kyoto; dividendi per l'Equity);

Tabella 5: redditività operativa

INDICATORI	IMPIANTO PICCOLO	IMPIANTO MEDIO	IMPIANTO GRANDE
Fatturato energia	125.073	1.042.272	4.169.088
Fatturato calore	56.000	134.400	630.000
Costo materie prime	64.350	357.048	1.626.849
Altri costi produttivi	59.520	484.800	1.606.667
Costi diversi	4.500	30.000	105.000
Reddito Operativo	52.703	304.824	1.460.573
Margine Operativo Lordo	82.223	531.624	2.427.239

L'analisi riportata in tabella evidenzia come gli impianti manifestino in tutti e tre i casi, una capacità di generazione di valore misurata appunto dal Reddito Operativo.

ANALISI FINANZIARIA DEI PROGETTI

Gli indicatori utilizzati

In tale contesto, e sulla base dei risultati economici sopra riportati, è stata introdotta l'analisi della struttura finanziaria dei tre progetti, sottoponendoli alla misurazione di alcuni indicatori per ogni possibile mix di Debito, Equity e Fondo Kyoto. In termini operativi per ognuno dei tre progetti si è proceduto a misurare quale sia la Redditività Netta ed i Flussi di Cassa Netti per ogni possibile struttura finanziaria. Gli indicatori utilizzati, al fine di misurare Redditività e Produzione di Cassa, sono riportati in tabella 6.

Tabella 6: indicatori economici e finanziari utilizzati

INDICATORE	DESCRIZIONE	RANGE VALORI
VAN FCFE (Valore Attuale Netto dei Flussi di Cassa per i Soci)	Valore Attuale dei flussi di cassa prodotti dall'investimento nel periodo di gestione al netto dei flussi in uscita relativi all'investimento iniziale.Misura il valore dell'investimento dal punto di vista dei Soci	Il VAN deve evidenziare un valore superiore allo zero e maggiore possibile
DSCR (Debit Service Cover Ratio)	E' il rapporto annuo tra il flusso di cassa operativo prodotto dalla gestione e la quantità di risorse assorbite dal debito. Misura la sostenibilità dell'investimento verificando che, in ogni anno, vi sia liquidità sufficiente a rimborsare il debito	Il DSCR deve avere, in tutti gli esercizi di durata del progetto, valore superiore ad 1,2
LIQUIDITA' MINIMA	E' il valore della consistenza di cassa a fine anno più basso in tutti gli anni interessati dal progetto. La liquidità minima può essere considerata un indice di rischiosità del progetto	La Liquidità Minima deve essere maggiore di 0 in tutti gli anni di gestione dell'investimento

Gli indicatori sopra descritti hanno, quindi, costituito i parametri utilizzati al fine di valutare, per ogni singolo progetto, quali strutture finanziarie (mix di Debito, Fondo Kyoto ed Equity) possano essere accettabili. In altri termini, nella analisi delle possibili struttura finanziarie dei tre progetti, si è pervenuto a determinare quali di esse siano in grado si soddisfare i range di parametri riportati in tabella scartando, evidentemente, quelle strutture finanziarie che manifestassero un VAN negativo, un DSCR inferiore a 1,2 od una liquidità minima negativa.

Ai fini della determinazione del VAN si è utilizzato un costo dell'Equity costante e determinato sulla base del tasso di indebitamento iniziale in quanto, nella valutazione della rischiosità dell'investimento da parte dei prestatori di Equity, esso costituisce un parametro soddisfacente.

Le strutture finanziarie utilizzabili

Con tale procedura si è pervenuti a determinare, per ogni progetto, quali siano le strutture finanziarie utilizzabili. In Fig. 2, si sono riportate le caratteristiche delle strutture finanziarie così individuate, rappresentandole graficamente in termini di rischiosità e rendimento. La rischiosità (posta sull'asse delle ascisse) è stata rappresentata attraverso la liquidità minima manifestata da ogni combinazione. Il rendimento (asse delle ordinate) è stato rappresentato in termini di VAN FCFE.

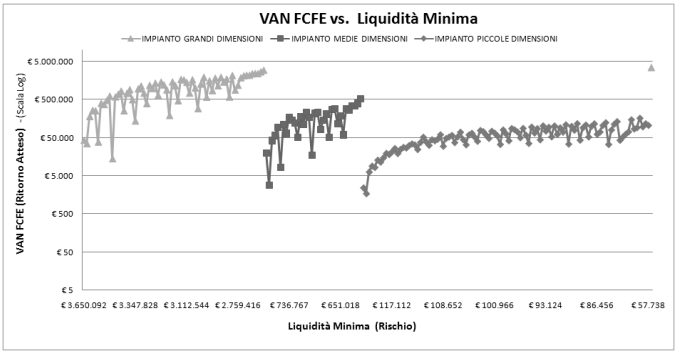


Figura 2: combinazioni rischio – rendimento

Il grafico evidenzia un insieme di combinazioni di rischio e rendimento realizzati da strutture finanziarie che rispettano i vincoli imposti nell'ambito dello studio. La figura tuttavia, presenta anche dei punti non ottimali, intendendo quelli per i quali ne esiste almeno un altro che, con lo stesso livello di rischio, manifesta un rendimento superiore. Eliminando tali punti si perviene al grafico riportato in Fig. 3 che rappresenta il rischio e rendimento delle sole strutture finanziarie ottimali.

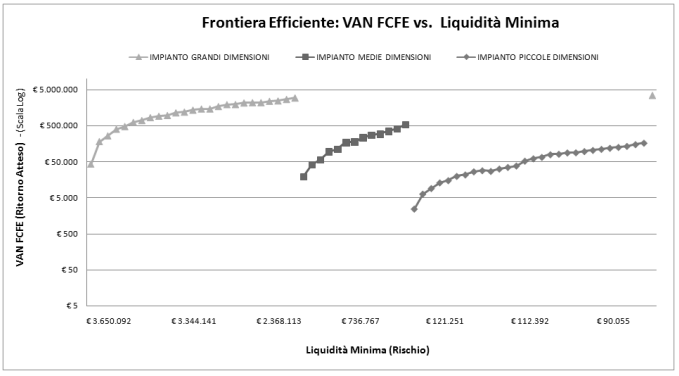


Figura 3: frontiera efficiente rischio – rendimento

In tale contesto si rileva anzitutto, come vi sia una correlazione diretta tra rischiosità e rendimento delle singole strutture finanziarie per ogni progetto. Su ognuno dei tre progetti si è evidenziato che strutture finanziarie con maggiore VAN FCFE mostrano una minore Liquidità Minima, comportando una maggiore rischiosità.

In Tabella 7 si è provveduto a sintetizzare i livelli minimi e massimi dell'incidenza delle tre modalità di finanziamento (Debito, Fondo Kyoto ed Equity). Tale analisi ha consentito di pervenire alla identificazione delle caratteristiche salienti delle strutture finanziarie utilizzabili.

Tabella 7: struttura finanziaria possibile

	IMPIANTO PICCOLO	IMPIANTO MEDIO	IMPIANTO GRANDE
D max	35%	30%	35%
D min	0%	0%	0%
E max	80%	65%	70%
E min	30%	40%	35%
K max	70%	55%	60%
K min	5%	25%	20%

In relazione al Fondo Kyoto lo studio ha evidenziato come sia necessaria una incidenza dello stesso di almeno il 5% (nel caso dell'impianto a combustione di piccole dimensioni), ed attorno al 20-25%, negli altri due casi esaminati. Si evidenzia inoltre come tutte e tre le tipologie di impianto richiedono un apporto di Capitale Proprio non inferiore al 30%. Un ulteriore aspetto rilevante consiste nel fatto che in nessun caso i progetti esaminati possono sostenere un'incidenza del Debito bancario superiore al 35% del totale.

Analisi della rischiosità

Una volta determinate le combinazioni Debito – Equity – Kyoto che rispondono alle ipotesi introdotte, e identificati i punti efficienti, si è proceduto a sottoporre le strutture finanziarie ad una analisi di rischiosità. A tale fine le strutture finanziarie efficienti sono state valutate alla luce della loro capacità di fronteggiare aumenti del prezzo del cippato.

Tale parametro infatti, risulta essere quello maggiormente critico nella costruzione dei piani economici di progetto in quanto esso costituisce l'unico elemento che, nel corso dei sedici anni analizzati, possa registrare variazioni significative tali da modificare la redditività economica e la sostenibilità finanziaria dei progetti.

Per tale motivo si è verificato, per ogni mix finanziario dei tre impianti, quale sia il livello di prezzo limite del cippato, in valore assoluto, che permetta comunque di mantenere un ritorno per i soci (VAN FCFE) ed una Liquidità Minima positivi.

Dalla sintesi riportata in figura 4 si rileva come, a fronte di un aumento del costo del cippato, si riduce il numero di strutture finanziarie sostenibili.

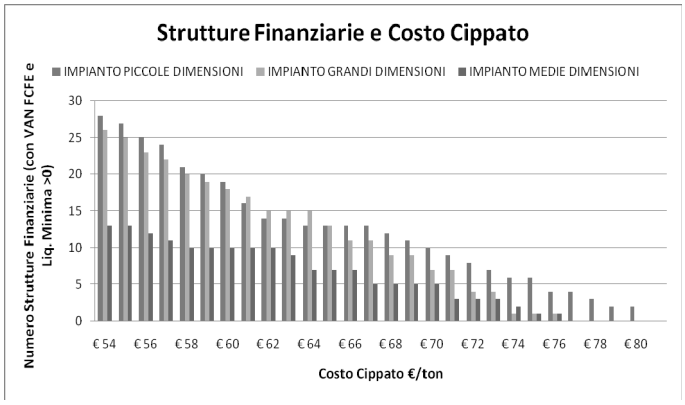


Figura 4: Prezzo del cippato e numero di strutture finanziarie sostenibili

Si rileva inoltre, come nessuna delle tre tipologie di impianto a biomassa è in grado di sostenere, indipendentemente dalla struttura finanziaria ottimale scelta, uno scenario in cui il prezzo del cippato si attesti al di sopra degli 81 €/ton nei quindici anni di operatività. Infatti a questi livelli nessun impianto sarebbe in grado di garantire un ritorno positivo agli investitori ed una liquidità minima costantemente positiva.

La tabella 8 riassume, per ognuno dei tre impianti il valore del prezzo massimo del cippato sostenibile dalle singole strutture finanziarie ottimali sopra analizzate.

Tabella 8: Sensitività degli impianti a variazioni di costo del cippato

TIPOLOGIA	MASSIMO COSTO CIPPATO (Netto IVA)
Impianto di piccole dimensioni	Tra € 54,48 e € 80,83
Impianto di medie dimensioni	Tra € 55,21 e € 76,25
Impianto di grandi dimensioni	Tra € 54,58 e € 76,04

In particolare, in relazione all'impianto a combustione di piccole dimensioni, si evidenzia come alcune strutture finanziarie (quelle con VAN FCFE più elevato ma con minore Liquidità Minima) sostengano una massima variazione del cippato di circa 54 €. Le strutture finanziarie con minore VAN FCFE e maggiore Liquidità Minima sono, invece, in grado di sostenere prezzi del cippato fino ad 80 € circa.

In relazione invece agli impianti "medio" e "grande", si manifestano valori analoghi (54 €) per le strutture finanziarie ad elevato VAN FCFE e ridotta Liquidità Minima mentre le strutture con minore VAN FCFE e maggiore Liquidità Minima non sostengono prezzi del cippato superiori a 76 €.

I risultati riportati mostrano come la dimensione degli impianti non sia garanzia di una maggiore capacità nel fronteggiare maggiori aumenti del costo della materia prima. Questo in parte può essere spiegato alla luce delle differenti tecnologie utilizzate per costruire gli impianti. In particolare l'impianto di medie dimensioni presenta rendimenti superiori rispetto a quello di grandi dimensioni. La richiesta di cippato per KWh generato infatti, risulta maggiore per il grande impianto con un conseguente impatto negativo sulla capacità di sostenere aumenti di costo della materia prima.

Inoltre i mix finanziari che generano ritorni per i soci più elevati hanno, come già descritto in precedenza, una minore capacità di sostenere variazioni nel prezzo del cippato. Queste strutture finanziarie presentano condizioni di criticità, dove cioè VAN FCFE e Liquidità Minima sono negativi già per valori di cippato attorno ai 55 €/ton.

In altre parole si evidenzia l'esistenza di una proporzionalità diretta tra redditività del progetto (rappresentata dal VAN) e la sua rischiosità identificando, come tale, l'incapacità di fronteggiare una elevata dinamica dei prezzi della principale materia prima. Tale risultato appare logico laddove si consideri che esiste un trade off tra redditività del progetto e liquidità minima. Sostanzialmente, siccome la redditività del progetto cresce inversamente rispetto alla liquidità minima (ed è proprio quest'ultima a costituire la capacità del progetto di fronteggiare le variazioni del prezzo del cippato) maggiore è la redditività del progetto, minore è la sua forza di assorbimento di variazioni di prezzo.

CONCLUSIONI

L'analisi di tre tipologie di impianti di produzione di energia a biomasse ha condotto, attraverso gli step di analisi riportati nell'ambito del testo, ad alcune conclusioni che, in questa sede, si vogliono sintetizzare.

Attraverso un processo di selezione delle strutture finanziarie (Debito – Fondo Kyoto - Equity) attivabili sui tre casi studio, si è pervenuti ad identificare quelle che rispondessero ad alcuni criteri di economicità e sostenibilità finanziaria (VAN FCFE > 0; DSCR minimo > 1,2; Liquidità Minima > 0). In seguito, tra queste, si sono individuate quelle

efficienti identificando una "frontiera efficiente" di strutture finanziarie.

In tale contesto si è rilevata anzitutto una correlazione diretta tra rischiosità e rendimento delle singole strutture finanziarie per ogni progetto (Figura 3). Su ognuno dei tre progetti si è evidenziato che strutture finanziarie con maggiore VAN FCFE mostrano una minore Liquidità Minima comportando una maggiore rischiosità.

Inoltre si è pervenuti alla identificazione delle caratteristiche salienti delle strutture finanziarie utilizzabili. In tale contesto è emersa da un lato la rilevanza del Finanziamento Kyoto che, allo stato attuale e sulla base degli input di progetto utilizzati, risulta indispensabile per tutti e tre i progetti; allo stesso tempo si è rilevato un fabbisogno di Capitale Proprio sempre superiore al 30% ed una sostenibilità del Debito inferiore al 40% del totale (Tabella 7).

Una ulteriore analisi ha riguardato la capacità delle strutture finanziarie individuate di sostenere variazioni del prezzo del cippato. Tale analisi, sintetizzata in Figura 4, è stata condotta verificando in ognuno dei tre progetti il numero delle strutture finanziarie sostenibili ai vari livelli di prezzo del cippato. Ciò ha consentito di verificare che non vi è nessuna struttura finanziaria che consenta di sostenere livelli di prezzo del cippato superiori ad 80 □.

I risultati cui si è pervenuti evidenziano quali siano le caratteristiche delle strutture finanziarie utilizzabili per il finanziamento degli impianti a biomassa in relazione agli attuali standard tecnologici rilevando, in tal modo, quali siano i vincoli in relazione al peso relativo delle varie tipologie di fonti di finanziamento attivabili (Debito – Fondo Kyoto - Equity).

Si è infine rilevata una proporzionalità diretta tra rendimento e rischiosità dell'investimento e di conseguenza, si è evidenziato come progetti più redditizi abbiano una inferiore capacità di sostenere elevati livelli di prezzo del cippato costituendo, quest'ultimo, in relazione a tali impianti, la principale materia prima.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Aswath Damodaran, Applied Corporate Finance: A User Manual, second edition, John Wiley & Sons, 2006.
2. Giancarlo Forestieri (a cura di), Corporate e Investment banking, Egea, 2007.
3. Decreto del Ministero della Agricoltura e Tutela del Territorio e del Mare del 25.11.2008, pubblicato in Gazzetta Ufficiale con Supplemento Ordinario n., 58 del 21.04.2009.
4. Protocollo di Kyoto alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, sottoscritto a Kyoto l'11 dicembre 1997 e reso esecutivo dalla legge 1° giugno 2002, n. 120.

EQUILIBRIUM HEAT AND MOISTURE TRANSFER IN SOILS WITH HEAT SOURCES

G. Galli, A. Vallati

Department of "Fisica Tecnica", La Sapienza University of Rome, Italy Via Eudossiana, 18 00184 Rome

ABSTRACT

In this paper the moisture and heat transfer around heat sources in soils is studied.

Determining the conditions for the drying out of the soil is an important issue when evaluating the thermal field around buried sources, i.e. high voltage cables or nuclear wastes, because the soil thermal conductivity decreases markedly, when the moisture evaporates, causing a strong increase of the source temperature.

In this paper a method to calculate the values of temperature and water content that determine the onset of a dried out zone around the heat source, is proposed.

INTRODUCTION

The current carrying capacity of buried high-voltage cables depends to a large extent on the thermal resistivity of the soil. This quantity is not constant for a given soil, but highly dependent on the moisture content. In turn, this moisture content is a function of meteorological and hydrological conditions. Once the resistivity is known, the current rating may be calculated from the geometry of the cables in the trench and the maximum allowable temperature of the dielectric insulation of the cable. Usually, this calculation is performed on the basis of IEC publication 287 [1]. More elaborate schemes have also appeared in references [2] and [7].

However, under the worst-case conditions mentioned above, the heat flux entering the soil from a cable into may cause a significant migration of moisture away from the cable. A

dried-out zone may develop around the cable, in which the thermal resistivity is enhanced by a factor of three or more over the resistivity of the bulk material. The onset of drying out is important for the temperature of the cable sheath, which is found to rise abruptly. This phenomenon is known as thermal runaway; it may cause excessive heating of the cable and may damage the electrical insulation. Therefore, in some countries, the practice has evolved of [1] in the calculation of the maximum permissible current rating; thus, allowing for a dried-out zone around the cables. In general, this is a too rigorous solution of the problem, mostly resulting in unnecessarily big cables.

In the opinion of several authors [2, 7], it is a better approach to base the thermal design of power cables on an analysis of the risk of an uncontrolled thermal runaway in unfavourable hydrological conditions. A prerequisite of such an analysis is a quantitative understanding of the physical phenomenon of drying out. The work reported in this paper was undertaken with the intention of improving matters in this respect.

The mechanism causing thermal runaway is well known. Apart from pure heat conduction through the grains and the water bridges between the grains, heat is also transmitted as a result of a "heat-pipe cycle" [4, 6]. Water evaporates in high temperature areas and condenses in lower-temperature areas. The resulting gradient in moisture content causes liquid water to flow in the opposite direction. Under normal circumstances, a steady state is reached. However, when certain critical conditions are exceeded, the liquid flow is not able to compensate the vapour flow, resulting in almost complete drying out of the soil near the heat source (Fig. 1).

In the present paper, the problem of determining the critical conditions is discussed, and an estimate of the maximum temperature before the occurrence of thermal runaway is obtained, following the De Vries model [2, 8].

The soil materials is supposed homogeneous; the Mualem – van Genuchten model as reported in Shaap is used [9] to evaluate the thermal and hydrological soil properties, and the thermal resistivity of the soil is treated as a constant over a cross-section of the trench.

MATHEMATIC MODEL

In the hypothesis of "heat pipe cycle" [4, 6], it is assumed that in any point the vapour flow is equal and opposite to the liquid flow:

$$J_v = -J_l \qquad 1)$$

The vapour flux is given by [5]:

$$J_v = -\lambda_p \cdot gradP_v \quad 2)$$

where

$$\lambda_p = \frac{D_e \cdot P}{R_v \cdot T \cdot (P - P_v)} \quad 3)$$

where D_e is the water vapour diffusion coefficient, R_v is the vapour constant, P and P_v are respectively the total gas phase pressure and the vapour pressure.

The vapour flow depends on the water content (θ), and the temperature (T), putting $P_v = P_s(T)\cdot\varphi$, where φ is the relative humidity, and $P_s(T) = \delta_s(T)\cdot R_v \cdot T$ it is obtained:

$$J_v = -\delta_l \cdot D_{\vartheta V} \cdot grad\theta - \delta_l \cdot D_{TV} \cdot gradT \quad 4)$$

where:

$$\delta_l \cdot D_{\theta v} = D_e \cdot \frac{P \cdot \delta_s}{P - P_v} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \vartheta_t} \quad 5)$$

while:

$$\delta_l \cdot D_{Tv} = D_e \frac{P \cdot \delta_s}{P - P_v} \cdot \left(\phi \cdot \frac{h_{lv}}{R_v \cdot T^2} - \frac{\phi \cdot \ln \phi}{T} \right) \quad 6)$$

where the following relation have been used:

$$\frac{dP_s}{dT} = P_s \cdot \frac{h_{lv}}{R_v \cdot T^2} \quad 7)$$

and the relative humidity is given as a function of the hydraulic potential and temperature by:

$$\phi = e^{\frac{\psi}{R_v \cdot T}} \quad 8)$$

where ψ is the hydraulic potential (J/kg), considered function only of the water content

In the hypothesis that the term $\ln \frac{\phi}{T}$ is negligible compared to $\frac{h_{lv}}{R_v \cdot T^2}$, the expression of the vapour flux is:.

$$J_v = D_e \frac{P \cdot \delta_s}{P - P_v} \cdot \left(\phi \cdot \frac{h_{lv}}{R_v \cdot T^2} \right) \cdot gradT - \frac{D_e \cdot P \cdot \delta_s}{P - P_v} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \vartheta_t} \cdot grad\theta \quad 9)$$

The liquid flow is defined by the [7]:

$$J_l = -\delta_l \cdot K \cdot (grad\psi - g) = -\delta_l K \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial \vartheta} \cdot grad\theta + \frac{\partial \psi}{\partial T} \cdot gradT - g \right) \quad 10)$$

where K is the hydraulic conductivity measured in seconds; it is represented by several models as function of the water content for various soil materials the Brooks Corey model [10] and the Mualem VanGenuchten model [9].

In this paper the Mualem VanGenuchtenmodel as reported in [9] is used.

In the expression of J_l the term $\left(\frac{\partial \psi}{\partial T} \cdot gradT - g \right)$ is neglected [3], as well as the term $\frac{D_e \cdot P \cdot \delta_s}{P - P_v} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \vartheta_t} \cdot grad\theta$ in the expression of J_v .

This approssimation can be used when the soil materials is almost saturated and the relative humidity (φ) is wherever close to 100%.

In this hypotesis the equation 1) becomes:

$$-\delta_l \cdot D_{Tv} \cdot gradT \approx -\left(-\delta_l \cdot D_{\vartheta l} \cdot grad\theta\right) \quad 11)$$

where

$$\delta_e \cdot D_{TV} = D_e \cdot \frac{P \cdot \delta_s}{P - P_v} \cdot \varphi \cdot \frac{h_{ev}}{R_v \cdot T^2}$$

and

$$\delta_e \cdot D_{\theta e} = \delta_e \cdot K \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \vartheta} \quad 12)$$

and where D_e is given by the relation [1, 10]:

$$D_e = D_0 \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.88} \quad 13)$$

with $D_0 = 21.7 \times 10^{-6}$

To take into account the free volume in the pores [2, 8, 3] the expression 13) is multiplied by:

$$f(\theta) = (G - \theta) \cdot \left(1 + \frac{\theta}{G - \theta_r} \right) \quad 14)$$

where G is the soil porosity and θ_r the residual value of the water content.

In addition to that, according to [11] and De Vries [2], the expression of D_e is multiplied by the enhancement factor ζ. According to Soil Physics [11] it is assumed ζ= 2.

In equation 12) with φ=1 e Pv=Ps, and dividing both members by f(θ) the left member depends only on temperature, and the right member depends only on water content; this means that in equilibrium conditions, the equation 12) brings to a relation between θ and T.

This approach has been used by several authors, [4, 6, 7, 12]. In particular [12] does not take into account the vapour pressure gradients produced by the temperature gradients to evaluate the water vapour fluxes.

Ewen [4] writes an equation equivalent to 12) but does not use explicit expressions of the vapour and liquid diffusivities and he says that a better approach to the determination of soil's critical temperature difference is a direct measurement using temperature probes.

In the present paper the vapour and liquid diffusivities are written as explicit functions of the water content and temperature using the thermodynamic properties of the water

vapour and the empirical expressions of the hydraulic conductivity as a function of the water content [9].

The hydraulic potential can be written as a function of the water content and temperature [7], but it can be seen that the temperature dependence is weak, so that it can be assumed that the hydraulic potential depends only on θ [9].

Integrating both members of equation 10) starting from known values θ_i and T_i, the following expression can be obtained:

$$\int_{T_i}^{T} D_e \cdot \frac{P \cdot \delta_s}{P - P_s} \cdot \frac{h_{ev}}{R_v \cdot T^2} dT = -\int_{\theta_i}^{\theta} \frac{\delta \cdot K}{\varsigma \cdot f(\theta)} \cdot \frac{d\psi}{d\theta} d\theta \qquad 15)$$

HYDROLOGIC PROPERTIES OF SOIL

In the equation 15) it is assumed that all the terms on the left member depends on the temperature while all the terms on the right members depends on the water content, so that it determines a functional relation between θ and T in equilibrium conditions. In particular when θ is equal to θ_r a maximum value of T is reached; this be considered the critical temperature of the soil materials, that determines the soil drying and the onset of the thermal runaway.

The parameters that determine the hydrological characteristics of soils are the water content θ, the hydraulic conductivity K and hydraulic potential ψ.

In this paper the representation method of [9] is used to express, for a given soil, the dependence of the hydraulic conductivity on the hydraulic potential.

In [9] the following relation between relative saturation, the hydraulic conductivity and the hydraulic potential are defined :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + (\alpha \cdot |\psi|)^n\right]^{1-1/n}} \qquad 16)$$

$$K(S_e) = K_0 \cdot S_e^L \cdot \left\{1 - \left[1 - S_e^{n/n-1}\right]^{1-1/n}\right\}^2 \qquad 17)$$

where K is the unsaturated hydraulic conductivity, S_e is the relative saturation, K_0 is a hydraulic conductivity acting as a matching point and L is a lumped parameter that accounts for pore tortuosity and pore connectivity, θ_r θ_s are residual and saturated water contents respectively (m^3m^{-3}). The following parameters α, n, L, θ_r θ_s e K_0 depend on the soil structure.

In [9] the soils are divided in four groups: sands loams silts and clays.

In this paper for the parameters α, n, θ_r, e θ_s the values reported in table 1 [9] are used. For K_0 and L four estimation models are proposed in [9].

The values reported in Model 1 are obtained by minimization of the differences between the S_e and K values from equations 16) and 17) and the experimental values.

In Model A, K_0 and L are not fitted but K_0 is assumed equal to the hydraulic conductivity at saturation and L=0.5.

In addition to that two additional sets of values for K_0 and L are obtained for sand and clays using other fitting methods (Model B2 and C2) [9].

The values of the hydraulic parameters obtained with the various estimation methods are reported in tables. 1 to 5.

Tab. 1 Main parameters for the four models

	N	θ_r	θ_s	$Log_{10}(\alpha)$	$Log_{10}(n)$
Sands	100	0.052 (0.043)	0.396 (0.056)	-1.58 (0.37)	0.349 (0.228)
Loams	41	0.056 (0.091)	0.512 (0.132)	-1.39 (0.50)	0.076 (0.047)
Silts	58	0.031 (0.058)	0.428 (0.078)	-1.95 (0.52)	0.139 (0.141)
Clay	36	0.098 (0.109)	0.512 (0.108)	-1.75 (0.64)	0.114 (0.112)

Tab. 2 Parameters for Model 1

	$Log_{10}(Ks)$	$Log_{10}(K_0)$	L
Sands	2.24	1.29	-1.28
Loams	2.03	1.42	-6.97
Silts	1.70	0.82	-1.22
Clay	1.31	0.26	-5.96

Tab. 3 Parameters for Model B2

	$Log_{10}(K_0)$	L
Sands	1.25	-1
Clays	0.85	-1

Tab. 4 Parameters for Model C2

	$Log_{10}(K_0)$	L
Sands	1.20	-0.73
Clays	0.70	-1.26

Tab. 5 Parameters for Model A

	$Log_{10}(K_0)$	L
Sands	2.24	0.5
Clays	1.31	0.5
Loams	2.03	0.5
Silts	1.70	0.5

These methods give for each groups of soils a remarkable dispersion of the K value as can be seen from Figure 1, where the values obtained by the four models for sand soils, are reported as function of the relative saturation, and from Figure 2 where Log K values are shown as function of the hydraulic potential.

The differences between the four models are important, particularly at low values of the relative saturation, and the values of the hydraulic conductivity in this range are important for the calculation of the critical temperatures.

Figure 3-6 show that temperature asymphtotic value is reached usually when the hydraulic potential is not much larger than 100 J/kg. For such values of ψ, equation (6') gives

a relative humidity (φ) very close to 100% and the hypothesis that φ is wherever constant and that $P_v = P_s$ can be justified.

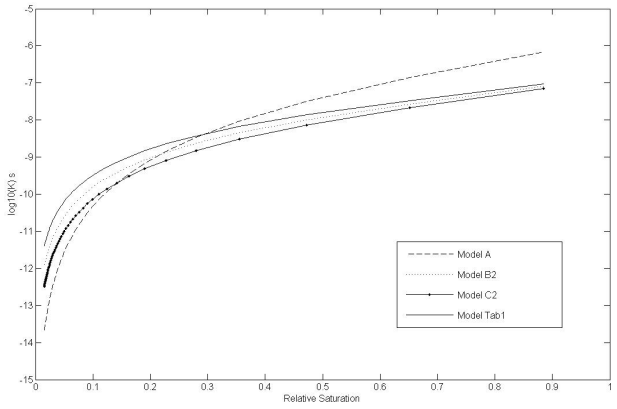


Figure 1. Values of Log(K) obtained by four fitting methods for sands soil as a function of the relative saturation.

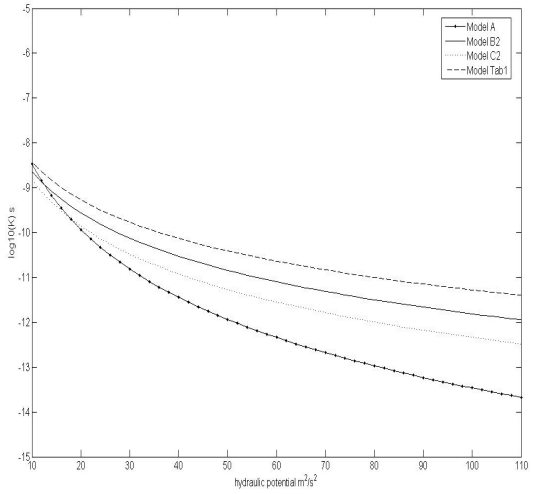


Figure 2. Values of log(K) obtained by four fitting methods for sand soils as a function of the hydraulic potential.

RESULTS AND CONCLUSIONS

The values of equilibrium temperature and water content have been evaluated from equation 13) for the soils of the sand group, for different values of the initial water content of the soil and for the four models for the hydraulic conductivity proposed in [9] (figures 3 to 6).

As can be seen in figures 3-6, when the hydraulic potential increases, the equilibrium temperatures tend to an asymptotic value. This will be assumed as the critical temperature. In tables 6 to 9 the critical temperatures, the initial and the asymptotic values of the hydraulic potential ψ (J/Kg), the water content θ (m^3/m^3)and the relative saturation S_e obtained by the four models of the hydraulic conductivity are reported.

Tab. 6 Tab.1 model: $\log_{10}K_o$=1.29; L=-1.28

ψ_i	ψ_{fin}	T_{fin}	S_{ein}	S_{efin}	θ_{in}	θ_{fin}
10	210	91.40	0.28	0.0069	0.148	0.054
15	215	80.1	0.175	0.0067	0.112	0.054
20	220	70.78	0.124	0.0065	0.095	0.054

Tab. 7 Model A: $\log_{10}K_0$=2.24; L=0.5

ψ_i	ψ_{fin}	T_{fin}	S_{ein}	S_{efin}	θ_{in}	θ_{fin}
10	210	79.49	0.28	0.0069	0.148	0.054
15	215	52.3	0.175	0.0067	0.112	0.054
20	220	36.7	0.124	0.0065	0.095	0.054

Tab. 8. Model B2: log10K0=1.25; L=-1

ψ_i	ψ_{fin}	T_{fin}	S_{ein}	S_{efin}	θ_{in}	θ_{fin}
10	210	82.8	0.28	0.0069	0.148	0.054
15	215	67.5	0.175	0.0067	0.112	0.054
20	220	56.65	0.124	0.0065	0.095	0.054

Tab. 9 Model C2: log10K0=1.20; L=-0.73

ψ_i	ψ_{fin}	T_{fin}	S_{ein}	S_{efin}	θ_{in}	θ_{fin}
10	210	72.96	0.28	0.0069	0.148	0.054
15	215	55.4	0.175	0.0067	0.112	0.054
20	220	44.43	0.124	0.0065	0.095	0.054

The following parameters are common to the four models:
θr=0.052; θs=0.396; $\text{Log}_{10}\alpha$=-1.58; Log_{10}n=0.349; T_i=20°C
where α in Kg/J and K_o in seconds

The comparison among the tables 6 to 9 and the figures 1 and 2, allows to observe that large differences in the critical temperatures correspond to the different values of the hydraulic conductivity given by the four models correspond: the higher the hydraulic conductivity (especially for small water content), the higher the critical temperature. In particular the Tab.1 model, valid for high values of K (figures. 1, 2), gives critical temperatures remarkably higher than the other models. That means that even in soils classified in the same structural group, the differences among the experimental values of the hydraulic conductivity are large; in order to get affordable predictions of the critical temperatures by the methods here proposed, an accurate determination of the hydraulic conductivity for each soil is then required.

REFERENCES

1. International Standard (IEC). Calculation of the continuos current rating of cables. IEC Publ. 60287, November 1993.
2. J.R. Philip and D.A. De Vries, Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Transactions of American Geophysical Union 38 2 (1957).
3. D. S. Freitas and Alvaro T. Prata. Thermal Performance of Underground Power Cables with Constant and Cyclic Currents in Presence of Moisture Migration in the Ssurrounding Soil. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, N°3 July 1996
4. J. Ewen. Susceptibility to Dryng of Unsatured Soil near Warm Impermeable Surfaces. International Journal of heat and Mass Transfer. Vol. 33 n°2 pp. 359-366 (1990).
5. Z. Q. Chen, m. H. Shi. Study of Heat and Moisture Migration Properties in Porous Building Materials.

Applied Thermal Engineering. Vol. 25, 01/2005 pp. 61-71
6. G. J. Groeneveld, A.L. Snijders, G. Koopmans and J. Vermer. Improved Method to Calculate the Critical Conditions for Dryng out Sandy Soils around Power Cables. IEE Proceedings, Vol. 131, N°2 March 1984, pp.42-53.
7. J. Y. Baladi, D. L. Ayers. Transient Heat and Mass Transfer in Soils. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 24 pp. 449-458 (1981).
8. D. A. De Vries. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited. International Journal of heat and Mass Transfer. Vol. 30 pp. 1343-1350 (1987).
9. M. G. Schaap and feike J. Leij. Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. Soil Science Society American Journal. 4:843-851 (2000).
10. Brooks R.H., Corey A.T.: Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow. Journal Irrigation Drainage Div. In Proc. Am. Soc. Civil Eng. (IR2) 1966, 92:61-88.
11. Soil Physics. Jury William A., Horton Robert, Wiley & Sons, 6th ed. 2004.
12. Donazzi, F. Occhini, A. Seppi. Soil Thermal and Hydrological Characteristics in Designing Underground Cables. IEE, Vol. 126, N°6, 1979.

L'IDROGENO COME OPZIONE ENERGETICA SOSTENIBILE

Giovanni Nicoletti, Gerardo Nicoletti

Università della Calabria, Dipartimento di Meccanica,
87030 ARCAVACATA DI RENDE (CS), Italy

SOMMARIO

L'esigenza del risparmio energetico e del perseguimento di un'economia, meno dipendente dalle fonti fossili, si sta coniugando sempre più con la necessità dell'utilizzo di risorse energetiche pulite, in particolare quelle date dalle fonti rinnovabili e alternative.

In questo scenario, le potenzialità del vettore idrogeno diventano più evidenti se vengono analizzate secondo un approccio intercomparativo con le altre fonti combustibili usualmente utilizzate.

Dopo aver tratto in rassegna le modalità e le strategie per la produzione di idrogeno verde, ipotizzandone gli usi più frequenti nei vari ambiti di intervento, si è ritenuto opportuno costruire degli indicatori dedicati per meglio comprendere i reali vantaggi dell'utilizzo della risorsa idrogeno, con particolare riguardo all'aspetto ambientale.

Tale valutazione giustifica la preferenza data all'idrogeno in un'ottica di sostenibilità economico-sociale-ambientale.

1. INTRODUZIONE

Le potenzialità dell'idrogeno, come vettore energetico, sono note dal diciannovesimo secolo, già a partire dal primo prototipo di motore a combustione interna, sviluppato da Isaac de Rivaz. Agli inizi del secolo scorso, anche l'inventore del motore diesel, Rudolf Diesel, sperimentò un motore alimentato da carbone e idrogeno polverizzato.

L'ipotesi suggestiva di un'economia all'idrogeno ha pervaso letteratura scientifica e non, divenendo, al giorno d'oggi, non solo una fantasia utopica ma una seria opportunità per conciliare i diversi aspetti energetici, econo-mici ed ambientali.

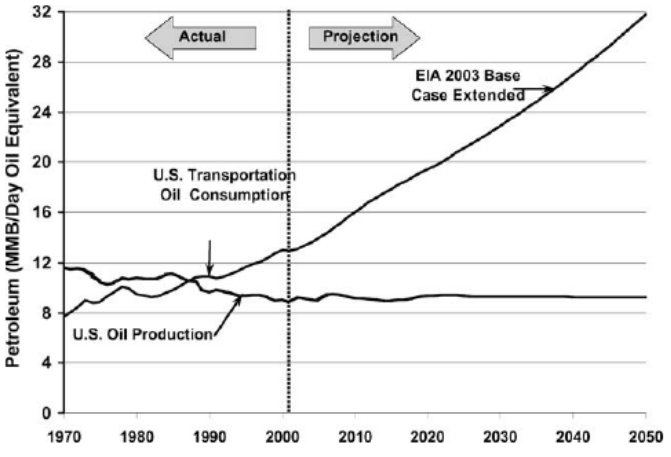


Fig. 1: Produzione del petrolio negli USA (Fonte U.S. Department of Energy e U.S. Energy Information Agency).

L'esigenza del risparmio energetico e del perseguimento di un'economia che riduca le dipendenze dalle fonti fossili esauribili, si è coniugata anche alla sensibilità ormai diffusa di miglioramento delle "*performances*" ambientali nella produzione energetica, essendo queste ultime direttamente connesse a questioni prettamente finanziarie.

E' ovvio che, al pari delle fonti rinnovabili e alternative (solare, eolico, geotermico) e in parallelo a quelle con-solidate (termoelettrico, idroelettrico, nucleare), l'idrogeno deve essere inquadrato come un medium per immagaz-zinare energia proveniente da varie sorgenti (reforming, idrosili) per rilasciarla secondo le modalità di fruizione ecologicamente più pulite rispetto ad altre fonti energetiche.

La fattibilità dell'utilizzo delle risorse energetiche alternative e rinnovabili trova, però, un differente risvolto per i paesi in via di sviluppo rispetto a quelli industrial-mente avanzati. I primi, impegnati nella costruzione di un'architettura economico-produttiva vedono con preoc-cupazione le prospettive di sostenibilità ambientale, su scala globale, che si traduce inevitabilmente in un sviluppo condizionato. Tuttavia è data loro occasione privilegiata per impostare fin da subito un sistema rispettoso delle istanze ambientali e proiettato nell'ottica del "*settino"* e non del "*reviewing"*, come accade per i paesi ormai sviluppati. Modificare i capisaldi di un'economia consolidata com-porta certamente uno sforzo organizzativo, tecnico ma anche economico non indifferente.

Un'economia all'idrogeno offre, però, indubbi vantaggi rispetto ai sistemi energetici tradizionali, in primis la qualità ambientale risultante dai processi che da esso derivano. Inoltre la rinnovabilità dell'idrogeno sta proprio nel fatto che, teoricamente, non ha limiti nella sua produzione (Caldera 2003), in quanto non rappresenta una fonte energetica primaria ma un vettore, un immagazzinatore energetico pulito. Esso

deriva da fonti multiple come combustibili fossili, biomasse, acqua (Turner 2004) e anche dal nucleare (Grant 2003).

La forza dell'idrogeno, tuttavia, non risiede solo nella derivabilità da altre fonti né nella sua capacità di *"conservatore"* energetico, ma si esplica attraverso il suo utilizzo, mediante *fuel cells* e motori a combustione interna cui detiene il migliore rendimento dal punto di vista di emissioni ambientali e connesso beneficio economico.

Accanto a questi significativi aspetti vanno considerati anche i punti di debolezza propri di un'utilizzazione più massiva dell'idrogeno. Primo tra tutti, va menzionato quello dello sviluppo ottimizzato di tecnologie a celle di combustibile per un suo uso performante (Wald 2004).

Secondariamente non bisogna tralasciare l'aspetto legato alla sua distribuzione fisica, mediante infrastruttura idonea.

Ultimo, ma non di minor importanza, è la questione dello storage, associato a tutte le problematiche legate ai problemi di sicurezza che comporta l'H_2.

Lo sviluppo di tecnologie meno dispendiose e più efficienti si rivolgerà, direttamente, anche ai settori ove la necessità di impostare una politica ambientalmente sostenibile è diventata aspetto cogente, come nell'industria dell'auto.

Nel fissare le linee di riferimento per una programmazione oculata del fenomeno idrogeno occorrerà chiarire:

a) la revisione del concetto di idrogeno e delle tecnologie *"fuel cell"*;
b) identificare le chiavi strategiche di proposizione a livello territoriale;
c) esaminare gli ostacoli all'implementazione di un'economia all'idrogeno;
d) verificare le iniziative a favore, presenti nei vari contesti economici;
e) proporre, a livello governativo, le iniziative mirate per il suo sviluppo.

2. LO STATO DELL'ARTE DELL'IDROGENO

L'idrogeno, al pari dell'elettricità, potrebbe giocare un importantissimo ruolo nei sistemi energetici con particolari risvolti nei trasporti. La sua versatilità, a livello molecolare, ne rende diretto il suo utilizzo, attraverso sistemi a fuel cells, per un uso statico (impianti di potenza, edifici, industria), dinamico (trasporti) e di immagazzinamento.

La produzione di energia attraverso le fonti alternative, come solare e eolico, comporta una produzione intermit-tente, che può essere migliorata e integrata attraverso le proprietà di vettore dell'idrogeno (Harris et al. 2004).

Attualmente l'idrogeno è prodotto, primariamente da gas naturale (48%), idrocarburi liquidi (30%), carbone (18%) e processi di idrolisi (4%) (Sperling and Cannon 2004). Gli sviluppi tecnici consentiranno di produrre tale risorsa attraverso sistemi foto-biologici, foto-chimici e foto-elettrochimici (Turner 2004).

Pur essendo un elemento diffusissimo nella biosfera ter-restre, è presente sotto forma di composti, difficilmente si trova in natura allo stato puro.

I problemi di storage dell'idrogeno, sono legati alle dif-ficoltà di immagazzinarlo come gas naturale compresso o sotto la forma liquida. Quest'ultima si realizza a -253 °C, corrispondenti a 20 K.

Esistono reti di produzione e distribuzione esclusiva-mente in Nord-Europa (c.a. 1.500 km) e negli Stati Uniti (c.a. 900 km).

La produzione di idrogeno ammonta a circa 20 bilioni di metri cubi per gli USA, cui seguono Europa e Giappone.

Tralasciando però la problematica legata alla con-servazione attraverso mezzi e fasi idonee, le celle a com-bustibile sviluppate sono raggruppabili in 5 categorie:

1) Proton Exchange Membrane *(PEMFC)*;
2) Alkaline *(AFC)*;
3) Phosphoric Acid *(PAFC)*;
4) Molten Carbonate *(MCFC)*;
5) Solid Oxide *(SOFC)*.

Le prime due operano in sistemi a temperature non molto alte e vengono utilizzate in pochi casi, le restanti hanno più ampia applicazione in relazione all'incremento delle temperature di esercizio.

Per fare un esempio le *PEMFC* vengono utilizzate per i veicoli. Purtroppo le *fuel cells* sperimentate per i veicoli ibridi come automobili, bus, tir e scooter comportano costi elevati e la produzione in serie non è stata mai vagliata come ipotesi.

3. LA SOSTENIBILITÀ DI UN'ECONOMIA ALL'IDROGENO

Gli effetti dell'utilizzazione di combustibili fossili, il mutamento delle condizioni climatiche, i problemi ener-getici e la carenza di risorse, produrranno a breve un detri-mento delle condizioni ambientali e umane, sia a livello locale che a livello globale.

L'inquinamento delle produzioni energetiche ha, pertanto, una valenza globalizzata in quanto coinvolge tutto l'ecosistema planetario, regolato da processi complessi di scambio di energia e materia, mutuamente interagenti.

Trasversalmente, la crescita della popolazione mondiale comporterà un sicuro aumento dello sviluppo tecnologico e, parallelamente, un incremento della domanda energetica.

Le prospettive sul consumo di combustibili fossili e la conseguente produzione di anidride carbonica portano a scenari drammatici che coinvolgono vari fattori e impatti quali temperatura, climi, scioglimento dei ghiacciai, incremento di fenomeni atmosferici catastrofici e cosi via.

In tal senso la produzione di idrogeno mediante fonti non fossili contribuisce a preparare una svolta epocale tesa alla riduzione drastica del ricorso a fonti esauribili ed inquinanti, promuovendo un maggiore e più performante sfruttamento della fonte solare mediante un vettore energe-tico pulito.

In breve i risultati dell'utilizzazione dell'idrogeno pos-sono tradursi in:

a) riduzione del ricorso a fonti fossili;
b) riduzione dei conflitti per l'approvvigionamento delle riserve energetiche;
c) incremento delle nuove tecnologie;
d) riduzione globale dell'inquinamento delle matrici aria, acqua, suolo e del depauperamento delle compagini boschive;
e) riduzione degli effetti nocivi delle attuali produzioni energetiche.

Mirare a questi obiettivi significa, primariamente, forni-re idrogeno attraverso fonti per lo più pulite e rinnovabili. Tuttavia, non è da escludere che esso possa, in un primo momento, essere prodotto mediante processi di conversione, *pirolisi* e *reforming* dagli stessi combustibili fossili, come carbone, gas, idrocarburi. Bisogna, però, tener presente che il primo e più importante risultato riguarda il miglioramento delle condizioni di salute umana e ambien-tale, in senso generalizzato.

Gli studi sul ciclo di vita di qualsiasi produzione energe-tica hanno mostrato come anche il ricorso a fonti appa-ren-temente rinnovabili possa nascondere delle insidie legate ai costi di smaltimento finali (il caso dei pannelli di silicio o le pale eoliche) non trascurabili. In ogni modo, impostare una politica energetica sulla risorsa idrogeno, o comunque de-dicare gran parte di essa, significa chiarire tutte le oppor-tunità che possono innescare il vettore H_2, e tutti i processi economico-sociali coinvolti.

Nello schema di fig. 2 si traccia un processo che parte dalle sorgenti di energia e giunge ai suoi utilizzatori finali. Il punto focale di questo schema consiste nel fatto che tutte le fonti *"verdi"* convergono alla produzione di idrogeno, che in questo caso è assimilabile alla corrente elettrica. In esso possiamo esaminare le più importanti fonti verdi quali solare, eolico, idroelettrico a cui è aggiunto il nucleare in quanto, considerando le prospettive dei reattori di ultima realizzazione, rientrerebbe a tutto titolo in questo processo.

L'idrogeno passa attraverso i processi di termolisi ed elettrolisi o gassificazione per produrre energia pulita. La caratteristica fondamentale del processo di formazione di energia da idrogeno risiede nel fatto che le combustioni catalitiche dello stesso non generano composti gassosi inquinanti (NO_x o CO_2) ma semplicemente vapore (H_2O) riprocessabile.

Perciò alla domanda di rito, perché dobbiamo produrre idrogeno la risposta è immediata ma non banale in un'ottica di sostenibilità: produrre una scorta energetica verde per uso industriale, automobilistico, nautico e aeronautico.

La sostenibilità al centro dello sviluppo rappresenta un punto strategico per risolvere problemi ecologici ma anche economici e produttivi. (Dincer e Rosen).

Un sistema energetico basato anche sull'idrogeno migliora la diversità energetica, con incremento di sicurezza nazionale

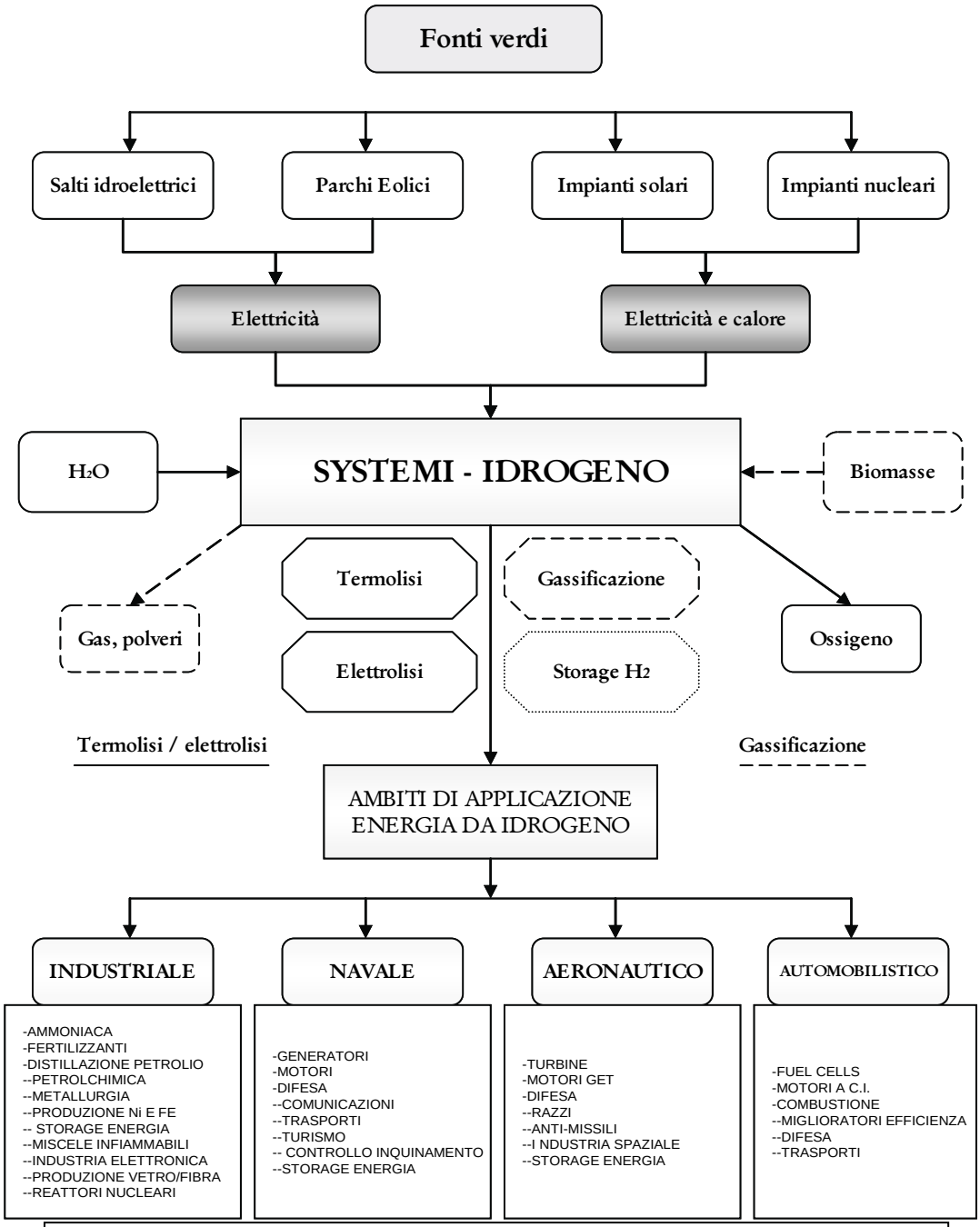


Fig. 2: Il ciclo "verde" dell'idrogeno

contro eventuali attacchi terroristici e alle riserve energetiche.

Le connotazioni di sistemi energetici basati sulla risorsa idrogeno (modularità, flessibilità, bassi costi operativi) differiscono sostanzialmente da quelli basati su fonti tradizionali (grandi investimenti, tempi di implementazione lunghi, incertezze sulle riserve). Tuttavia è importante aggiungere che l'energia verde basata sull'idrogeno potrebbe essere introdotta con disinvoltura nelle mura domestiche.

La stabilità e la sostenibilità di questa energia verde si basa su:

- ridotto impatto ambientale;
- varietà del suo utilizzo;
- la dislocabilità a bassa scala.

Il sistema ad idrogeno, se ben sostenuto, potrebbe giocare un ruolo fondamentale nello scenario futuro, rim-piazzando tutti i sistemi basati sulle fonti tradizionali.

La produzione di idrogeno ammonta a circa 50 milioni di tonnellate, il 2% della domanda energetica mondiale.

Tuttavia il consumo totale annuo di idrogeno ammonta a circa 400-500 bilioni di Nm3. Di questo gran parte è rappresentata da produzione interna e solo una piccola aliquota da mercato. La quasi totalità è prodotta da combustibili fossili, anche se sono note le tecniche di produzione da fonti verdi, peraltro richiamate. I numeri sono anche considerevoli: mediante elettrolisi è possibile convertire 1m^3 di acqua in circa 108,7 kg di idrogeno, con energia pari a 422 litri di petrolio. E' particolarmente interessante anche la densità energetica per unità di massa che ammonta a 141,9 MJ/kg di idrogeno liquido o gassoso.

Per le ragioni suddette, l'impostazione di un'economia energetica basata sull'idrogeno implica la predisposizione di un palinsesto organizzativo che includa il programma di riferimento, gli attori di questa implementazione e i destinatari più direttamente coinvolti in questo processo.

4. INDICI DI COMPARAZIONE CON ALTRE FONTI.

Il degrado dell'ambiente naturale è cresciuto a tal punto da rendere necessarie misure e metodologie di riduzione delle emissioni inquinanti.

La concentrazione di anidride carbonica, negli ultimi anni, è aumentata fino al livello di 550 ppm, ovvero circa 1000 mg/Nm³. Sebbene tale valore sia, da un punto di vista fisiologico, sopportabile per l'uomo, tuttavia non lo è per l'ambiente fisico, poiché crea una perturbazione climatologica estesa che si traduce in un aumento della temperatura media della terra (noto come effetto serra). Tale situazione, come è assodato, porta a tutta una serie di problemi, già citati in introduzione, di seria importanza.

Una riduzione auspicabile dell'utilizzo dei combustibili fossili, fonte primaria di produzione di CO_2, potrebbe coincidere con lo sviluppo di forme di energia rinnovabili a basso impatto come l'idrogeno solare.

Lo sviluppo di cicli energetici virtuosi, come quelli riportati nel lavoro I 16 I, andrebbe, però, preventivamente valutata attraverso strumenti numerici in grado di confron-tare la bontà di una risorsa rispetto alle altre.

Per la comparazione di differenti tipologie di combusti-bili, che possono essere tratte in rassegna, si può utilizzare una metodologia che presupponga la predisposizione di opportuni indici di qualità. In particolare, l'inquinamento, l'infiammabilità e l'espansività di idrogeno e di principali combustibili fossili, come carbone, metano e petrolio, introducendo le seguenti quantità:

Indice di inquinamento

$$i_{jk} = \left(1 - \frac{x_{jk}}{P_{ci} / c_p T_0} \right)_{\substack{j=a\to d \\ k=1\to 6}}$$

dove:

x_{jk} = concentrazione in massa delle sostanze inquinanti ($kg_{inquinanti}/kg_{combustibile}$);
P_{ci} = potere calorifico inferiore (J/kg);
c_P = calore specifico a pressione costante (J/kg K);
T_0 = temperatura di infiammabilità (K);
j = tipi di combustibili;
k = prodotti di combustione.

Indice di espansione

$$i_{jv} = \left(\frac{\left(v''' / v'' \right)_j}{P_{ci} / c_p T_0} \right)_{j=a\to d}$$

dove v'', v''' sono rispettivamente i volumi specifici di combustibile nella fase fluida e gassosa o i suoi vapori (m³/kg).

Indice di infiammabilità

$$i_{jT} = \left(\frac{T_c - T_0}{T_c} \right)_{j=a\to d}$$

dove T_c = temperatura di combustione (K).

Inoltre, è stata predisposta una serie di indici normaliz-zati i*, in relazione ai valori massimi dei i_j, per evidenziare, in modo chiaro, una distinzione qualitativa. Alcuni di essi sono stati ottenuti, utilizzando le produttorie i_{jk}*, i_{jv}*, i_{jT}*.

I risultati di questi indici normalizzati sono riportati, in modo esemplificativo, nelle figure seguenti.

Gli indici di inquinamento sono stati valutati in considerazione del vapor d'acqua prodotto. Quest'ultimo, in realtà, non rappresenta un inquinante vero e proprio, ma è utile per operare un confronto con la risorsa idrogeno, essendo recuperabile mediante operazione di condensazione.

Alla luce di questo quadro quantitativo, si può definire l'impatto ambientale complessivo, provocato dall'uso di un certo combustibile nel cosiddetto riscaldamento urbano, attraverso la seguente formula:

$$i_{amb.} = \left(\prod_{j=1}^{n} i_{jC}^{*}\, i_{jV}^{*}\, i_{jT}^{*} \right)^{\frac{p}{p!}}$$

Nel caso specifico, i valori dell'impatto ambientale per i combustibili generalmente utilizzati nel riscaldamento urbano ed elencati in precedenza, sono stati collezionati nella Tabella 3.

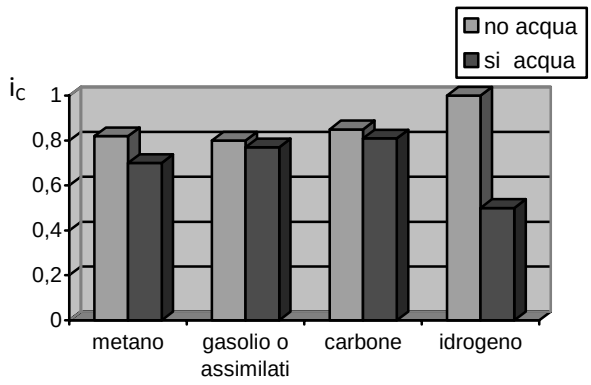


Fig. 3: Indici di inquinamento

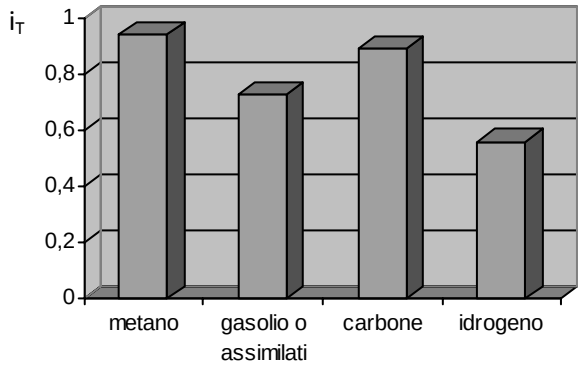


Fig. 4: Indici di infiammabilità

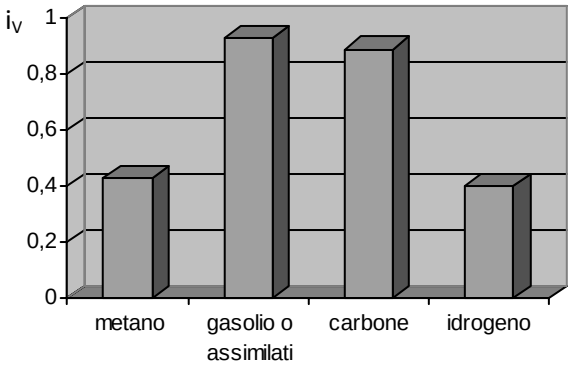


Fig. 5: Indici di espansività

Aspetti economici

Il confronto economico tra i vari tipi di combustibili studiati e l'idrogeno verde è stato condotto attraverso un'analisi dei costi di dettaglio. Sebbene, di primo acchito possa sembrare cosa semplice, questa operazione è, operati-vamente, complessa a causa di molteplici fattori di carattere tecnico ed economico.

Per quanto riguarda l'idrogeno prodotto da energia solare, studi recenti hanno mostrato un costo per unità di energia prodotta dell'ordine di 195 □/GJ. Tale importo, inclusivo dell'intero processo fotovoltaico ed elettrolitico, risulta dieci volte più alto rispetto a quello ottenuto in maniera convenzionale attraverso i combustibili fossili.

Tuttavia, includendo costi di natura sociale e ambientale, il margine sarebbe stato più ridotto. Sulla base di questa analisi complessiva è stata predisposta una valutazione comparata delle varie opzioni energetiche secondo i principi dell'economia reale e il ciclo di vita della fonte energetica, qualunque essa sia.

Pertanto i costi reali sono frutto del prezzo del combustibile e del danno ambientale stimato per la sua utilizzazione nel settore residenziale, industriale, elettrico e di trasporto.-

I risultati di questa analisi sono stati graficati nelle figure riportate nell'articolo di bibliografia N° 16 e qui riproposte nell'Appendice.

Tabella 3: Impatto ambientale dei diversi combustibili

Combustibile	Impatto ambientale i_{amb}.
Metano	0,90 0,80 (no H_2O)
Gasolio ed assimilati	0,76 0,72 (no H_2O)
Carbone	0,82 0,78 (no H_2O)
Idrogeno verde	0,95 0,45 (no H_2O)

4. CONCLUSIONI

In uno scenario di lungo periodo l'emergenza ambientale impone l'elaborazione di strategie alternative all'attuale sistema inquinante dei consumi energetici.

Tra le vie percorribili, l'uso su vasta scala dell'idrogeno ed in particolare di quello prodotto da fonte solare appare come una delle più promettenti al fine della graduale sostituzione dei combustibili fossili in tutto il sistema dei consumi energetici.

Nel lavoro abbiamo cercato di dimostrare, in modo anche quantitativo, alcuni indubbi vantaggi nell'impiego dell'idrogeno come combustibile, quando non si consideri inquinante il vapor d'acqua: questo, d'altronde, può venir parzialmente riciclato per condensazione.

Le scarsi doti dell'idrogeno per quanto attiene all'elevata espansività possono accettarsi quando si voglia immagazzinarlo ad alta pressione (100-150 bar), anziché allo stato liquido. In quest'ultimo caso bisognerà calcolare e curare meticolosamente sia l'isolante termico, sia l'impermeabilizzazione dei serbatoi, sia l'essicazione dell'aria di intercapedine o di vacuosità, per evitare ponti termici di ghiaccio.

Abbiamo con questo lavoro tratteggiato, sia pure sinteticamente, un'ipotesi, che potrebbe dirsi utopistica o rivoluzionaria, ma che viene sostenuta con convinzione da molte parti, di economia energetica ad idrogeno.

In particolare, il ciclo, immaginato da noi, sole-energia elettrica-elettrolisi dell'acqua-energia elettrica di seconda generazione è concettualmente verosimile, ma, per poterne superare le forti difficoltà, occorrerà probabilmente attendere ancora alcuni decenni. Le difficoltà non sono solo scientifiche, tecniche ed economiche, ma, soprattutto, politiche.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. R.Arienti, G.Nicoletti. Entropy: An Extraphysical Pratical Application, 6th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering. May, 1993, Seoul, Korea.

2. G.Nicoletti. The Idrogen option for energy: a review of technical, environmental and economic aspects. Int J Hydrogen Energy 1995;20(10):759–765.
3. L.A.Graham, G.Rideout, D.Rosenblatt, J.Hendren. Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles. Atmospheric Environment 42 (2008) 4665–4681.
4. R. Quadrelli, S. Peterson. The energy–climate challenge: Recent trends in CO2 emissions from fuel combustion. Energy Policy 35 (2007) 5938–5952.
5. T.W.Hesterberg, C.A. Lapin, W.B.Bunn. A Comparison of Emissions from Vehicles Fueled with Diesel or Compressed Natural Gas. Environ. Sci. Technol., 2008, 42 (17), 6437-6445
6. S.Dunn. Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. Int J Hydrogen Energy 2002;27:235–264.
7. H.K. Abdel-Aal,M. Sadik,M. Bassyouni,M. Shalabi. Anew approach to utilize Hydrogen as a safe fuel. Int J Hydrogen Energy 2005;30:1511–1514.
8. S. Szwaja, K.R. Bhandary, J.D. Naber. Comparisons of hydrogen and gasoline combustion knock in a spark ignition engine. Int J Hydrogen Energy 2007;32:5076-5087.
9. G. Wang, J. M. Ogden, M. A. Nicholas. Lifecycle impacts of natural gas to hydrogen pathways on urban air quality. Int J Hydrogen Energy 2007;32:2731-2742.
10. C. S. Daw, K. Chakravarthy, J. C. Conklin, R. L. Graves. Minimizing destruction of thermodynamic availability in hydrogen combustion. Int J Hydrogen Energy 2008;31:728-736.
11. T. Shudoa, K. Omorib, O. Hiyamac. NOx reduction and NO2 emission characteristics in rich-lean combustion of hydrogen. Int J Hydrogen Energy 2008;33:4689-4693.
12. G. Wanga, J. M. Ogden, D. Sperling. Comparing air quality impacts of hydrogen and gasoline. Transportation Research Part D 13 (2008) 436–448.
13. Work Book 2005. Putting energy in the spotlight: BP statistical review of world energy, [also available at http://www.bp.com/centres/energy#, accessed in March 2006].
14. EIA 2005. World carbon dioxide emissions from the consumption and flaring of fossil fuels, 1980–2003. http://www.eia.doe.gov/emeu/ aer/overview.html. Table posted: July 11, 2005.
15. Dincer I, Rosen MA. Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development. Renewable Sustainable Energy Rev 2005;9: 169–89.
16. G. Nicoletti, Hydrogen as Solar Energy Storage – Technical and Economical Aspects - Int. Congress Hypothesis, Cassino, June 1995.

APPENDICE

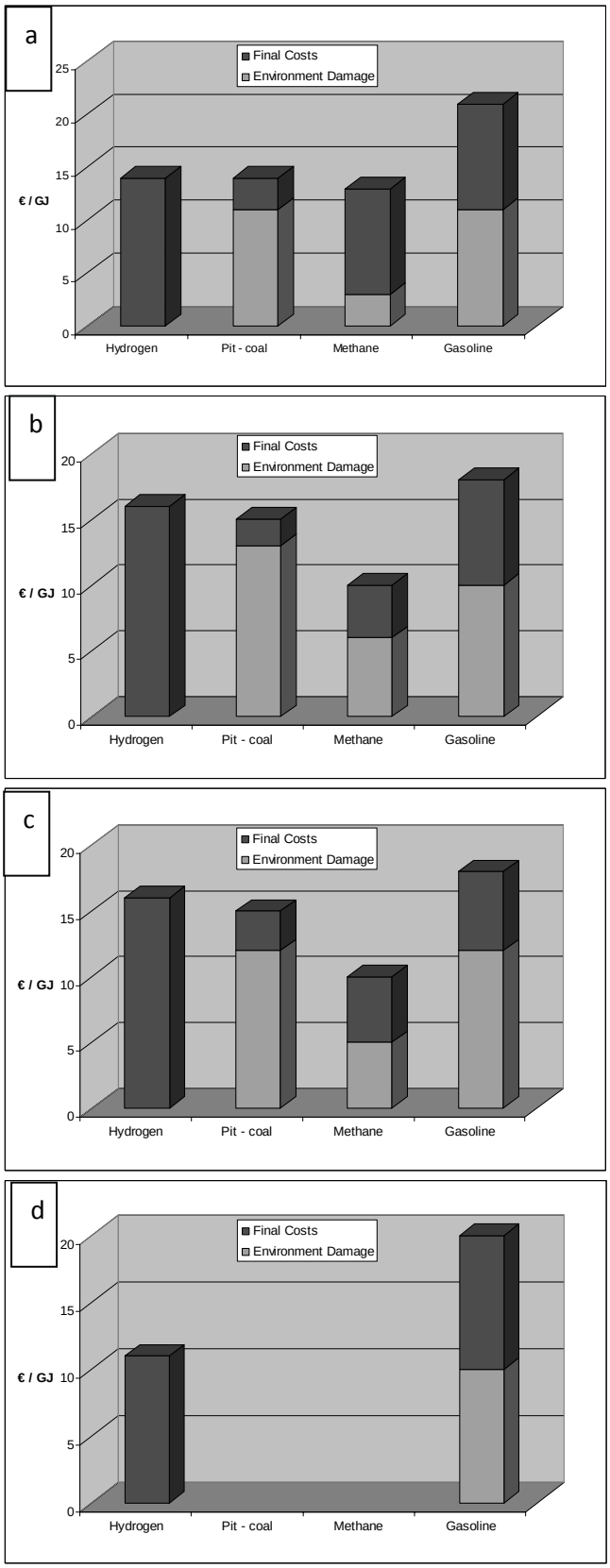


Fig. 6: Costi del combustibile e quantificazione del danno ambientale nei settori: a) residenziale; b) industriale; c) elettrico; d) trasporto.

SESSIONE

MOBILITÀ SOSTENIBILE

IL TRASPORTO AEREO E LO SVILUPPO SOSTENIBILE

Eva Valeri

Università di Trieste, DISES, Piazzale Europa 1, 34127 Trieste, eva.valeri@units.it

SOMMARIO

Le recenti tendenze verificatesi a livello internazionale e la costante crescita della domanda e dell'offerta di servizi di trasporto aereo hanno influenzato considerevolmente lo sviluppo delle attività aeroportuali e posto maggiore attenzione all'impatto ambientale prodotto dagli stessi. Queste tendenze, congiuntamente alla crescente importanza assunta nella politica comunitaria Europea dei trasporti dallo "sviluppo sostenibile", condizionano l'espansione del trasporto aereo ad essere guidato non soltanto da fattori di natura economica, ma anche e, soprattutto, da considerazioni di carattere ecologico, ambientale e sociale.

Dopo aver evidenziato le tipologie di impatti ambientali generati dagli aeroporti è stata sottolineata l'importanza dell'integrazione di politiche di tutela dell'ambiente e della salute pubblica nelle politiche economiche e settoriali nell'industria del trasporto aereo. Inoltre, è stata proposta una panoramica degli orientamenti politici e degli atti legislativi più rilevanti che a livello europeo indirizzano gli interventi in materia di tutela ambientale con riferimento all'industria del trasporto aereo. In particolare, si evidenzia la ripartizione dei compiti di legiferazione tra le istituzioni e le organizzazioni internazionali nonché l'esigenza di un'azione integrata e coordinata ai diversi livelli. Infine, sono stati evidenziati i punti chiave della strategia ottimale per il raggiungimento dell'obiettivo di lungo termine di promozione dello sviluppo sostenibile nel trasporto aereo.

INTRODUZIONE

Per l'Europa il trasporto aereo rappresenta un settore economico, sociale e strategico di notevole rilevanza ed interesse, il cui valore è accresciuto velocemente nel corso degli ultimi anni. Questo settore è considerato un elemento determinante per il turismo internazionale in quanto facilita gli spostamenti di massa, alimenta gli scambi culturali e con essi i benefici sociali che ne derivano in termini di qualità della vita. Inoltre, costituisce una fonte indiscussa di benefici come l'incremento del reddito della popolazione e dello Stato e dell'occupazione [16]. Nota la rilevante valenza economica di questa industria, le scelte politiche e strategiche, alla base della sua gestione, si sono basate fino a qualche tempo fa quasi esclusivamente su criteri di crescita economica (con obiettivi di breve e medio periodo). Infatti in passato la tutela del patrimonio ambientale e dello sviluppo sostenibile (obiettivi di lungo periodo) sono state tematiche trascurate [16]. Tuttavia, come evidenziato in seguito, il settore aereo se da un lato genera benefici, dall'altro condiziona negativamente sia l'ambiente sia la qualità della vita delle popolazioni che vivono nelle vicinanze degli aeroporti. Si identifica una relazione "circolare" tra le politiche economiche e quelle ambientali e sociali: l'incremento del valore economico del trasporto aereo è concorrente alla tutela della salute pubblica e della gestione delle risorse naturali. La gestione e il coordinamento delle dinamiche sopra esplicate presuppone un impegno politico a diversi livelli. L'argomento è molto complesso, in quanto caratterizzato da una pluralità di soggetti coinvolti e da una concatenazione di cause ed effetti generati non soltanto dall'area aeroportuale e dalla sua attività, ma anche dalle strutture ad esso collegate e che nel corso del tempo aumentano tanto il valore economico dell'area stessa quanto i rischi per l'ambiente e la salute pubblica.

La letteratura scientifica che ha caratterizzato fino a qualche anno fa questo settore ha trattato prevalentemente l'analisi degli impatti generati da macro tendenze quali globalizzazione, liberalizzazione nonché l'accresciuta competizione tra operatori [7]. Dagli anni Novanta, invece, il mondo scientifico ed accademico ha studiato vari aspetti legati alla sostenibilità nel trasporto aereo come la misurazione di indicatori di sostenibilità, l'identificazione di strategie di sostenibilità per gli aeroporti, la valutazione delle *performances* dell'aeroporto a seguito dell'internalizzazione delle esternalità, la comparazione con altre modalità di trasporto (*high speed train*) etc. [3-7-8-9-10-14].

Black [2] definisce la sostenibilità come "*satisfying current transport and mobility needs without compromising the ability of future generations to meet these needs*''. Tale definizione include non solo obiettivi ambientali, ma anche sociali ed economici [7].

L'obiettivo principale di questo lavoro è quello di: da un lato, evidenziare l'importanza dell'integrazione di politiche di tutela dell'ambiente e della salute pubblica nelle politiche economiche e settoriali nell'industria del trasporto aereo e dall'altro, mostrare una panoramica degli orientamenti politici e degli atti legislativi più rilevanti che a livello europeo indirizzano gli interventi in materia di tutela ambientale nell'ambito dell'industria del trasporto aereo.

IL TRASPORTO AEREO E IL CONCETTO DI SVILUPPO SOSTENIBILE

Con riferimento all'aviazione, l'integrazione degli aspetti ambientali nel settore dei trasporti presuppone un impegno politico a diversi livelli. A livello europeo, questo approccio dovrebbe essere caratterizzato da un forte interesse alla

cooperazione intersettoriale e dalla valorizzazione costante del principio di sviluppo sostenibile [13]. Come ricordato in precedenza, quest'ultimo concetto esprime l'esigenza di preservare il flusso di risorse naturali a cui il trasporto aereo attinge per garantire anche alle generazioni future il godimento di tali risorse. Uno sviluppo sostenibile presuppone, quindi, l'integrazione e salvaguardia di tre tipologie di aspetti:

1. *Economici*: valore commerciale attribuito al settore del trasporto aereo in termini di costi e benefici;
2. *Ambientali*: insieme delle risorse naturali circostanti all'area aeroportuale;
3. *Sociali*: impatto che le strutture aeroportuali hanno sulla qualità della vita e sulla salute pubblica delle popolazioni che risiedono nelle zone limitrofe del sedime aeroportuale.

Si auspica al raggiungimento di un compromesso tra gli aspetti sopra elencati, in modo da non compromettere né il sostegno che il settore del trasporto aereo europeo rappresenta per l'economia, né la capacità dell'ambiente di riprodurre le sue risorse nonché la salute ed il benessere psicofisico delle popolazioni. Il conseguimento di questo obiettivo dipende inevitabilmente da adeguate politiche di integrazione. Non a caso a livello europeo si tende a promuovere il concetto di trasporto *environmentally friendly* [6].

L'importanza dell'integrazione tra le politiche è stata riconosciuta ufficialmente dall'art.6 del Trattato di Amsterdam del quale emerse che "*le esigenze connesse con la tutela dell'ambiente devono essere integrate nella definizione e nell'attuazione delle politiche e azioni comunitarie (…), in particolare nella prospettiva di promuovere lo sviluppo sostenibile*". Sebbene le autorità ambientali possano formulare politiche che influenzano i più importanti settori economici, è ritenuto più efficace ed efficiente che i decisori politici del settore dei trasporti tengano conto dell'ambiente quando formulano le loro strategie politiche [16]. Questo approccio è conosciuto come "integrazione delle politiche ambientali nelle politiche economiche e settoriali" ed è il presupposto di ogni indirizzo di sviluppo sostenibile. Per realizzare concretamente questa integrazione è necessario: *i)* migliorare gli standard tecnici ambientali relativi alle emissioni di gas e da rumore; *ii)* rafforzare gli incentivi economici e regolamentari di mercato; *iii)* sostenere le strutture aeroportuali nei loro sforzi verso la tutela ambientale; e, infine, *iv)* produrre miglioramenti tecnologici di lunga durata [5].

IMPATTI AMBIENTALI GENERATI DAGLI AEROPORTI

Gli aeroporti, producendo servizi di trasporto aereo attraverso una complessa interazione di risorse e di processi, agiscono e operano come un'impresa [17].

L'impatto ambientale generato dagli aeroporti può essere classificato in due macrocategorie [18]:

- *air side*: comprende gli impatti ambientali causati dal rumore e dalle emissioni gassose (derivanti dalle operazioni dei velivoli e dei mezzi di supporto);
- *land side*: include gli impatti prodotti dalle gestione e funzionamento delle infrastrutture aeroportuali e dal traffico di superficie (generato in aeroporto o in nelle vie di accesso allo stesso).

In particolare, le principali tipologie di impatto ambientale degli aeroporti sono riconducibili [15]:

- all'effetto sulla qualità locale dell'aria derivante dalle emissioni gassose degli aerei che operano sull'aeroporto e dalle infrastrutture/attrezzature di supporto;
- all'effetto del rumore degli aerei sulla popolazione;
- all'occupazione del territorio e l'urbanizzazione derivante dallo sviluppo dell'aeroporto;
- all'effetto derivante dal consumo energetico,
- dallo sfruttamento di falde idriche locali;
- dalla produzione dei rifiuti solidi, liquidi e gassosi.

Tra gli impatti sopra elencati quello a cui viene attribuita maggiore rilevanza è quello del rumore, percepito negativamente soprattutto per chi vive in prossimità degli aeroporti. Questa esternalità produce maggiori disturbi alla popolazione nelle seguenti quattro fasi: 1) nel decollo; 2) nella fase iniziale di salita; 3) la fase finale di discesa; e, infine, 4) nella fase di frenata.

ORIENTAMENTO DELLE POLITICHE AMBIENTALI DEL TRASPORTO AEREO

L'ICAO (International Civil Aviation Organization) [11] è l'organizzazione che detta gli orientamenti generali delle politiche ambientali per il settore oggetto del presente lavoro. In particolare, le regole elaborate dall'ICAO rappresentano il quadro di riferimento dell'Unione europea per l'emanazione della legislazione comunitaria. L'ICAO nella Convenzione di Chicago [12] ha stabilito gli standard internazionali di riferimento per limitare l'impatto ambientale dei velivoli. Gli sforzi dei costruttori di aerei e delle compagnie aeree nel rispettare gli standards sono stati in parte vanificati dall'aumento del traffico aereo rilevato negli ultimi anni. All'interno dell'ICAO è stato costituito il Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP) al quale è stato affidato l'obiettivo strategico della protezione ambientale. Questo comitato rappresenta 18 Paesi e include anche rappresentanti della CE, di associazioni ambientalistiche, dell'AIA (Aerospace Industries Association), dell'IATA (International Air Transport Association) e dell'ACI (Airport Council International).

L'Unione Europea ha il compito di implementare quanto stabilito dall'ICAO e di adottare misure coercitive nei confronti di coloro che operano all'interno degli Stati membri (per esempio imposizione di tasse anti rumore) [15].

Di seguito sono forniti alcuni atti legislativi di particolare rilievo adottati a livello comunitario dal 1980 al 2007:

- Direttiva 80/51/EEC sulla limitazione delle emissioni acustiche provenienti dagli aerei subsonici.
- Direttiva 89/629/EEC sulla limitazione delle emissioni acustiche provenienti dai aerei subsonici civili a reazione.
- Direttiva 92/14/EEC del 2 marzo 1992 sui limiti di volo imposti agli aeromobili compresi nel volume I parte II, capitolo 2 dell'allegato 16 alla convenzione sull'aviazione civile internazionale.
- COM(97) 629 - proposta di direttiva del Consiglio Europeo sulle limitazioni delle emissioni di ossidi di azoto degli aerei subsonici civili a reazione.
- Regolamento 925/99/EC sulla immatricolazione e impiego nella Comunità di alcuni tipi di aerei subsonici civili a reazione che sono stati modificati o ri-certificati conformi alle norme del volume I, parte II, capitolo 3, dell'allegato 16 alla convenzione sull'aviazione civile internazionale.
- COM(1999) 640 della CE al Consiglio, al Parlamento Europeo e al Comitato delle Regioni relativa alla definizione di una strategia comune a livello Europeo

coerente e rispettosa dell'ambiente nel settore del trasporto aereo.

- Decisione 1296/99/EC del Consiglio e del Parlamento europeo che adotta un programma di azione comunitaria sulle malattie connesse con l'inquinamento nel contesto del quadro d'azione nel settore della sanità pubblica (1999-2000).
- COM(2000) 468 - proposta di direttiva del Consiglio e del Parlamento Europeo relativa alla determinazione e gestione del rumore ambientale.
- COM(2000) 821 della CE al Consiglio Europeo riguardante la definizione dei seguenti obiettivi nella 33ª Assemblea dell'ICAO: *i)* affrontare il problema dell'incremento dell'inquinamento acustico dovuto dall'aumento della domanda di trasporto aereo; *ii)* introdurre norme più rigorose per tutte le tipologie di emissioni gassose prodotte dagli aerei; *iii)* rafforzare il sostegno di incentivi economici per migliorare le prestazioni ambientali degli aeromobili.
- Direttiva 2002/30/EC del Parlamento e del Consiglio Europeo relativa l'istituzione di regole e procedure per introdurre restrizioni alle attività che generano rumore negli aeroporti della Comunità. L'obiettivo della presente direttiva è quello di evitare l'aumento del livello di rumore generato dagli aerei e, al contempo, di cercare di ridurre tale livello per migliorare l'attuale ambiente acustico (mediante, per esempio, graduale sostituzione degli aerei più rumorosi).
- Regolamento (CE) n. 1702/2003 della Commissione che stabilisce le regole di attuazione per la certificazione di aeronavigabilità ed ambientale di aeromobili e relativi prodotti, parti e pertinenze, nonché per la certificazione delle imprese di progettazione e di produzione. Il regolamento fissa, pertanto, le condizioni per:
  - il rilascio di certificati di omologazione, di certificati di omologazione ristretti, di certificati di omologazione supplementari e le relative modifiche;
  - il rilascio di approvazioni di progetti di riparazione;
  - la dimostrazione dell'osservanza dei requisiti in materia di protezione ambientale;
  - il rilascio di certificati acustici;
  - l'identificazione di prodotti, parti e pertinenze;
  - la certificazione delle imprese di progettazione e di produzione;
  - l'emissione di direttive di navigabilità.
- COM(2005) 459 della CE al Consiglio, al Parlamento Europeo e al Comitato delle Regioni riguardante la riduzione dell'impatto del cambiamento climatico generato dal trasporto aereo. La CE oltre a proporre come misure per ridurre l'impatto generato dal settore del trasporto aereo sui cambiamenti climatici (come la ricerca, la gestione del traffico aereo e la tassazione dei prodotti energetici), promuove l'integrazione di questo settore all'interno del *Community Emissions Trading Scheme*.
- "Clean Sky Joint Technology Initiative (JTI)" [4] è una partnership pubblico –privata (VII Programma Quadro – Cooperazione) che opererà fino al 2017 perseguendo, con riferimento al trasporto aereo, i seguenti obiettivi:
  - Accelerare lo sviluppo di tecnologie sempre più ecosostenibili;
  - Garantire un'efficace coordinamento delle ricerche su temi afferenti il trasporto aereo a livello Europeo;
  - Garantire innovatività e competitività all'intero sistema;
  - Promuovere la produzione di conoscenza nonché l'utilizzo ottimale dei risultati delle ricerche condotte.

Questa parthership si propone l'ulteriore scopo di ridurre entro il 2020 le emissioni di CO_2 del 50%, ossidi di azoto dell'80% e l'inquinamento acustico del 50%.

Oltre all'ICAO vi è un'altra importante Associazione internazionale e che prende il nome di ATAG (Air Transport Action Group) [1]. Questo gruppo rappresenta tutti i settori dell'industria del trasporto aereo ed è l'unica a riunire, quindi, tutti gli operatori del trasporto aereo (etc.) per promuovere la crescita sostenibile dell'intera industria. I membri sono costituiti principalmente da gestori aeroportuali, compagnie aeree, costruttori di aerei e motori, fornitori di servizi, sindacati dei piloti e controllori del traffico aereo, Camere di Commercio, partner commerciali, ma anche da ACI, Airbus, Boing, CFM International e IATA. Con riferimento alla tematica della tutela ambientale, ATAG svolge il ruolo di promuovere la creazione di posizioni comuni su specifiche questioni grazie alla realizzazione di tavoli di concertazione tra i membri. In particolare, ATAG:

- sostiene un'azione coordinata su temi strategici (come l'inquinamento acustico);
- promuove una visione comune tra i membri;
- effettua analisi e ricerche per lo sviluppo coerente di dati e informazioni.

Per indirizzare lo sviluppo dell'aviazione e degli aeroporti in una direzione sostenibile è indispensabile, pertanto, un'azione integrata e coordinata a diversi livelli per raggiungere obiettivi di breve, medio e lungo periodo. A livello europeo, l'ICAO e Unione Europea devono rispettivamente stabilire gli *standards* di riferimento a cui tutti gli stati membri devono adeguarsi e implementare la normativa ICAO anche con azioni coercitive. A livello nazionale, i governi dei singoli stati, nel definire le politiche di trasporto, devono da un lato, tenere conto delle direttive sovranazionali e dall'altro, definire politiche che tengano conto anche delle specificità ecologiche ed ambientali del territorio.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

In Europa la crescita dell'industria del trasporto aereo è stata caratterizzata da un ritmo di crescita superiore a quello dell'introduzione di innovazioni tecnologiche ed operative che consentono di ridurre l'impatto ambientale alla fonte [16]. Nonostante i noti benefici economici/sociali che sottostanno all'espansione di questo settore, è indispensabile, quindi, che i parametri di sostenibilità ambientale si conformino a quelli definiti dall'ICAO e dall'Unione europea per la salvaguardia del patrimonio ambientale. Nota la necessità di porre come obiettivo di lungo periodo la promozione dello sviluppo sostenibile, la strategia ottimale che emerge dall'analisi proposta deve basarsi sulle seguenti azioni chiave [16]:

- *Integrazione* tra le politiche ambientali e di salute umana con quelle colte a ottimizzare l'utilizzo delle risorse naturali e miglioramento continuo delle performance complessive dell'industria.
- *Coordinamento* tra i differenti attori coinvolti nella gestione del sistema aeroportuale al fine di adottare misure concertate. È necessario promuovere anche a livello comunitario soluzioni coerenti e coordinate tra gli Stati membri per evitare distorsioni della concorrenza e

per garantire trasparenza nella gestione dei problemi ambientali.

- *Supporto comunitario* agli Stati membri fornendo incentivi economici e regolamentari per consolidare il vantaggio commerciale dell'industria del trasporto aereo nel rispetto dell'ambiente e della salute pubblica.
- *Monitoraggio* dell'impatto ambientale aeroportuale sistematicamente aggiornato e rivisitato. È auspicabile, quindi, promuovere la predisposizione di sistemi di monitoraggio ambientali in tutti gli aeroporti europei, affinché le strategie applicate trovino corrispondenza nella realtà e soddisfino le esigenze ambientali e sociali.

In conclusione, solo la valorizzazione dei principi sopra esposti in un'ottica di coordinamento intersettoriale può consentire di ridurre i danni connessi all'attività aeroportuale. In questo modo sembra infatti possibile preservare le risorse naturali per le generazioni future, prevenire i danni alla salute della comunità locale ed economizzare sugli interventi atti alla risoluzione dei danni causati da una gestione insostenibile del servizio aeronautico.

BIBLIOGRAFIA

1. ATAG – sito web: http://www.atag.org/content/default.asp
2. W. R. Black, Sustainable transport: a US perspective, *Journal of Transport Geography* 4, 151–159, 1996.
3. M. D. Campbell, A strategy for sustainability for small national airport system airports, presentation at the International association of airport executives Canada, 1996.
4. Council Regulation (EC), No 71/2008, setting up the Clean Sky Joint Undertaking, http://europa.eu/legislation_summaries/transport/air_transport/i23040_en.htm
5. European Environmental Agency - EEA, Are we moving in the right direction? Indicators on transport and Environment. Integration in the European Union, Copenhagen, 02/2000.
6. European Environmental Agency - EEA, Air and Health, Copenhagen, http://reports.eea.eu/int/2599XXX/en/page003.html, 2001,
7. A. R. Goetz, B. Graham, Air transport globalization, liberalization and sustainability: post-2001 policy dynamics in the United States and Europe, *Journal of Transport Geography*, 12, pp. 265–276, 2004.
8. B. Graham, 2003. Air transport policy: reconciling growth and sustainability? In: Docherty, I., Shaw, J. (Eds.), A New Deal for Transport? Blackwell, Oxford, pp.198–225.
9. B. Graham, C. Guyer, Environmental sustainability, airport capacity and European air transport liberalization: irreconcilable goals?, *Journal of Transport Geography* 7, 165–180, 1999.
10. D.L. Greene, M. Wegener, Sustainable transport, *Journal of Transport Geography* 5, 177–190, 1997.
11. ICAO – sito web: http://www.icao.int/
12. ICAO, Annex 16, http://www.icao.int/icao/en/env/NoiseCertification_04/BIPs/bip2_02.pdf
13. Organisation of Economic Cooperation and Development - OECD, "Advanced Air Quality Indicators and Reporting, Methodological Study and Assessment", document n. ENV/EPOC/PPC(99)9/FINAL, 28/09/1999.
14. Organization of Economic Cooperation and Development - OECD, Competitive interaction between airports, airlines and high speed train, discussion paper n. 2009-7, maggio 2009.
15. G. U. Panetta, Il trasporto aereo e lo sviluppo sostenibile. I programmi di espansione degli aeroporti tra spinte economiche e vincoli ambientali, working paper, Cranfiled University.
16. V. Paponetti, La sostenibilità del settore aeronautico in Europa: Aeroporti, ambiente e salute: una convivenza difficile? http://www.covest.org/Approfondimenti/Aeropori%20ambiente%20e%20salute.pdf
17. M. Riguzzi, L'impresa aeroportuale, CEDAM, Padova, 1984.
18. R. Zucchetti, O. Baccelli, Aeroporti e Territorio – Conflitti e opportunità di sviluppo, EGEA, Milano, 2001.

USO DI MEZZI A DUE RUOTE E POLITICHE DI TUTELA DELLA SALUTE

Amanda Blomberg Stathopoulos

Università degli studi Trieste, Facoltà di Economia, Piazzale Europa 1, 00161 Roma,
amandairini.blombergstathopoulos@phd.units.it

SOMMARIO

Dagli anni 90 si è visto aumenti notevoli nelle attività motociclistiche in molti paesi europei. In alcuni paesi lo scooter è il principale mezzo di trasporto nella città. L'uso dei mezzi su due ruote è associato a importanti esternalità. Proiezioni indicano che i mezzi su due ruote emetteranno oltre 7% di CO e quasi 20% del HC sul totale del trasporto su strada nel 2012, in assenza di ulteriori misure regolamentari. Solo recentemente governi e istituzioni sovranazionali iniziano a riconoscere che questo modo di trasporto è stato trascurato in termini di interventi relativi alla sicurezza e al inquinamento. Inoltre, le determinanti della scelta modale riguardo le due ruote sono scarsamente comprese. Insieme alla mancanza di dati per valutare i rischi alla salute associato all'uso del mezzo non è chiaro quale esito avranno politiche innovative. Nonostante il ruolo centrale dello scooter vi è una mancanza notevole di studi per ampliare la conoscenza dei fattori che influenzano la domanda di utilizzo delle due ruote. Questo lavoro illustra la scarsa considerazione dei determinanti dell'uso dello scooter che compromette l'efficenza delle politiche proposte. Si discute infine sulla relazione complessa fra scelta di trasporto, rischi personali e collettivi di salute e politiche di intervento.

INTRODUZIONE

I veicoli su strada costituiscono importanti fonti d'inquinamento atmosferico urbano e di emissioni di gas serra globale. I trasporti sono responsabili del 28% delle emissioni di CO_2 nella UE, dove oltre l'80% di tali inquinanti sono ascrivibili al traffico su gomma. Su scala mondiale, i veicoli a motore emettono attualmente oltre 900 milioni di tonnellate di CO_2 ogni anno. Il presente paper analizza il ruolo dei mezzi a due ruote (d'ora in poi M2R) nel favorire e rafforzare una diversa e più sostenibile ripartizione modale volta a:

a) Migliorare la mobilità, la sicurezza, la qualità e ad ampliare la libertà di scelta per i cittadini e le imprese in tutta la catena degli spostamenti;

b) Limitare l'aumento della congestione;

c) Ridurre l'impatto ambientale del traffico riducendo le emissioni di biossido di carbonio CO2, ossidi d'azoto (NOx), ozono (O3), monossido di carbonio (CO) idrocarburi (HC) e polveri sottili (PM).

In generale, è possibile rilevare nella politica europea di mobilità una mancanza di interesse o una parziale inconsapevolezza circa il potenziale ruolo dei M2R nel soddisfare una parte rilevante della domanda di mobilità, soprattutto urbana. Facendo riferimento alle differenti soluzioni legislative, alla struttura urbana, al livello d'innovazione tecnologica e agli aspetti comportamentali di ciascuna realtà nazionale, è possibile comprendere il ruolo e il successo dell'implementazione di un set di politiche di trasporto in grado sia di soddisfare i bisogni della mobilità sia di assicurare la sua sostenibilità per favorire una crescita economica sostenibile nel tempo.

MOBILITA' URBANA SOSTENIBILE

Il concetto di sviluppo sostenibile è da tempo riconosciuto come un fattore importante per la formulazione di strategie politiche a lungo termine. A parte problemi storici come l'inquinamento atmosferico nelle aree urbane ed il cambiamento climatico, si è assistito, negli ultimi anni, all'affiorare di numerose questioni di sostenibilità; ad esempio, la bio-diversità, la congestione del trasporto, l'esclusione sociale, gli squilibri regionali ed i conseguenti rischi politici. In tale contesto e nell'agenda politica europea, il settore dei trasporti assume una valenza strategica particolare, rivestendo il ruolo di settore prioritario di intervento per garantire la sostenibilità dello sviluppo [1, 2, 3]. Lo scopo finale del trasporto urbano è incrementare l'accessibilità alle città consentendo alla collettività di godere delle economie d'urbanizzazione. Tale scopo d'efficienza nell'offerta di trasporto implica sia costi diretti (pagati dall'utente), sia costi esterni (sostenuti dalla collettività). Nel tentativo di controllare questi effetti esterni negativi, sono stati realizzati interventi pubblici per garantire un certo livello dimobilità, sia bilanciando le esigenze di efficacia, sia attenuando i problemi di congestione, degrado ambientale e sicurezza, provocati dalla mobilità delle persone.

E' importante tenere presente che la mobilità è incorporata nelle attività umane e che il valore della mobilità consiste nell'accrescimento dei contenuti e delle dimensioni di tali attività. Senza questa comprensione, le statistiche ed i modelli per descrivere e prevedere i fenomeni connessi alla mobilità delle persone, perdono gran parte della loro valenza conoscitiva e sociale.

USO DI VEICOLI A MOTORE A DUE RUOTE

Dagli anni 90 si è visto aumenti notevoli nelle attività motociclistiche in molti paesi europei. In alcuni paesi lo scooter è il principale mezzo di trasporto nella città. La maggior parte della crescita del traffico è dovuto ai Paesi industrializzati dell'OCSE. In Europa i "Veicoli a motore a due ruote" -- una categoria che comprende sia i motocicli sia, per la maggior parte, i ciclomotori -- ammontano ad almeno 30 milioni nel 2006 [4]. Tale cifra costituisce circa il 12% dello stock d'auto calcolato per lo stesso anno. I M2R risultano più diffusi nei Paesi dell'Europa meridionale. Infatti, 6 paesi sui 27 della UE rappresentano oltre l'80% del mercato europeo. I mercati maggiori, in ordine d'importanza per quota di mercato europeo totale, sono nel 2007, 1) Italia, 2) Francia, 3) Spagna, 4) Germania, e, 5) Gran Bretagna. Possiamo notare che gli italiani sono palesemente i maggiori utilizzatori di tale mezzo. Con circa 10 milioni di mezzi a due ruote, l'Italia rappresenta quasi il 36% dello stock totale della UE. Invece, fra i Paesi maggiori il Regno Unito ha mostrato la crescita più rapida tra il 1995 ed il 2006, con un tasso del 76%. Considerando, invece, l'uso in relazione alla popolazione complessiva, l'Italia risulta ancora il primo Paese, con oltre 170 mezzi a due ruote per 1.000 abitanti, seguito in questo caso da Spagna e Grecia.

Nonostante la crescita dello standard tecnologico dei veicoli, molti miglioramenti attesi in termini di efficacia del carburante sono annullati dalla scelta dei consumatori di usare mezzi più pesanti e fare viaggi più lunghi. Inoltre, l'uso inefficace dei mezzi, soprattutto a causa della congestione che affligge molte zone urbanizzate dell'Europa, fa sì che il fattore di inquinamento, misurato in condizioni sperimentali, risulti molto più basso del fattore reale nelle vere condizioni di guida. In questo momento, l'Unione Europea propone di rafforzare l'attuale "Accordo volontario" per renderlo obbligatorio, con l'obiettivo di portare le emissioni di CO_2 a 120g/km per le nuove autovetture. Tuttavia, come nota Schipper [5], ci vorranno almeno 20 anni prima che tali modifiche possano diventare leggi e produrre effetti sulla programmazione della produzione e sullo stock dei veicoli.

Mentre la letteratura lascia pochi dubbi sul fatto che livelli più elevati di efficienza dei propulsori possano essere raggiunti, è altrettanto chiaro che tale risultato sarà reso sempre più difficile da un continuo aumento del peso dei veicoli, della loro maggiore potenza e, soprattutto fra i M2R, dal potenziamento delle caratteristiche funzionali e prestazionali dei mezzi. Per tali motivi, dunque, appare necessario prevedere un sistema di gestione delle trasformazioni al fine di stimolare un ricambio più rapido rispetto ai tassi attuali.

COSTI E BENEFICI DELLA MOBILITÀ A DUE RUOTE

Qualsiasi attività di trasporto genera costi oltre che benefici. Non tutti i costi ed i benefici influiscono soltanto sul benessere di chi consuma la mobilità. Alcuni costi, infatti, ricadono su altre persone o sulla società nel suo complesso. Si può, pertanto, distinguere tra i cosiddetti "costi interni" o privati, a carico della persona impegnata nell'attività di trasporto, ed i cosiddetti "costi esterni", ovvero quelli che ricadono su altri soggetti. In termini generali, le esternalità sorgono ogni volta che il benessere di un individuo è influenzato dalle attività di altri soggetti inconsapevoli delle eventuali conseguenze delle loro azioni. Un'analisi completa delle esternalità del trasporto su gomma in ambito urbano richiederebbe una trattazione assai più vasta di quanto spirito e finalità del presente lavoro consentano. In questa sede ci si chiede quali siano le dimensioni relative dei costi esterni marginali legati all'uso dei M2R. Per costo marginale esterno si intende la parte del costo marginale sociale non sostenuto da chi fa uso del mezzo. In secondo luogo, si analizzano i collegamenti tra l'uso di differenti politiche volte a contenere i costi e le specificità dei M2R. Si ipotizza che le condizioni locali influenzino l'evoluzione dei costi esterni e che le politiche d'internalizzazione debbano variare di conseguenza.

La qualità della vita nelle aree urbane è sicuramente minacciata dall'uso eccessivo di mezzi di trasporto non adatti. La mancanza di sicurezza, il forte inquinamento, il rumore, i cambiamenti climatici indotti, gli impatti sulla salute e la pressione sullo spazio urbano determinano un generale deterioramento della qualità della vita nelle aree urbane. Nei seguenti paragrafi si descriverà il ruolo delle M2R nell'ambito di tre tipologie di costi esterni: più precisamente la congestione, le emissioni ambientali e la sicurezza.

Mobilità a due ruote e congestione

Gli attori, nell'effettuare le scelte di trasporto, tendono a considerare soltanto i propri costi ed il proprio tempo. Se tutti ragionassero in questo modo, si creerebbe traffico in eccesso che danneggerebbe gli utenti stessi. Una soluzione basata sull'introduzione di tariffe per l'utilizzo delle infrastrutture, potrebbe correggere questa distorsione, poiché il prezzo pagato dal singolo utilizzatore riflette l'effettivo costo imposto alla società nel suo complesso. E' ragionevole ipotizzare che differenti utenti valutino in modo diverso il valore del tempo che potrebbe essere risparmiato. La questione del valore del tempo assume, quindi, un ruolo fondamentale nel determinare il costo sociale dell'impiego sub-ottimale delle risorse.

Gran parte della domanda di trasporto soddisfatta tramite mezzi non adatti alle aree urbane, può essere facilmente evitata. Secondo la Commissione Europea, ciascun cittadino europeo effettua in media circa 3 spostamenti al giorno, di cui, circa la metà risulta inferiore ai 3 km [6]. Inoltre, metà degli spostamenti in automobile risulta di 6 km o più brevi. Queste cifre dimostrano chiaramente che il potenziale per sostituire l'auto con viaggi in ciclomotore, motociclo, bicicletta o a piedi sia enorme. Ad esempio, gli scooter sono difficilmente superabili in convenienza su brevi tragitti e, in particolare, se non si prevede l'utilizzo di autostrade. La velocità massima per un ciclomotore di 50cc può risultare anche inferiore ai 45 Km/h. Questo, insieme al peso e alla dimensione ridotta, rende critici gli spostamenti sulle autostrade, risultando, pertanto, vietati dal codice della strada. Nelle aree urbane, invece, queste caratteristiche negative si trasformano in vantaggi. Il ciclomotore e, più limitatamente, il motociclo risultano più maneggevoli e più adatti nella guida in situazioni di congestione del traffico, e si rivelano più vantaggiosi anche in fase di parcheggio. Data l'ingente crescita del traffico urbano il ciclomotore si rivela essere il mezzo più utile ed adatto nei luoghi dove ne é consentito l'uso. In generale vi è una seria mancanza di dati per sostenere le affermazioni che sia lecito promuovere l'utilizzo delle M2R nell'ambito urbano. Inoltre, prima di stabilire che i governi nazionali, attraverso le legislazioni, dovrebbero facilitare o promuovere l'uso delle M2R è necessario controbilanciare la nozione che le regolamentazioni con le stime dell'impatto negativo sull'ambiente e sulla sicurezza.

Mobilità a due ruote e impatto ambientale

Come visto in precedenza, i veicoli su strada costituiscono importanti fonti d'inquinamento atmosferico urbano e di emissioni di gas serra globale. I trasporti sono responsabili del 28% delle emissioni di CO_2 nella UE, dove oltre l'80% di tali inquinanti sono ascrivibili al traffico su gomma. Su scala mondiale, i veicoli a motore emettono attualmente oltre 900 milioni di tonnellate di CO_2 ogni anno. A causa delle numerose flotte di veicoli, i Paesi sviluppati sono responsabili di una quota proporzionalmente grande delle emissioni. Nel 1993, i paesi dell'OCSE generavano circa due terzi delle emissioni di CO_2 mondiali, anche se tali Paesi costituiscono solo il 16% della popolazione mondiale. Purtroppo, i dati sul trasporto su M2R sono di difficile reperimento perché, in generale, le statistiche relative alle emissioni si riferiscono o all'uso delle automobili o riguardano l'intero settore del trasporto su gomma.

Sono numerosi i fattori che influenzano le emissioni dei veicoli di trasporto. Tra questi, si ricordano: a) le caratteristiche del veicolo: il peso, la forma del veicolo, il tipo di motore, il tipo di carburane e la capacità di carico; b) le caratteristiche operative: la velocità di marcia e la dinamica di guida (variazioni di velocità durante la guida -- accelerazione e decelerazione--); c) i fattori logistici: i tassi di occupazione e la densità delle reti di infrastrutture che possono determinare la distanza percorsa; d) il ciclo di vita: emissioni legate alla fornitura e alla manutenzione delle infrastrutture, dei veicoli, e dei carburanti.

Il principale vantaggio derivante dall'impiego dei M2R in ambito urbano è evidenziato da alcuni studi pilota che sottolineano la loro maggiore efficienza energetica rispetto ai mezzi a quattro ruote [7]. Tale aspetto è, in parte, controbilanciato dalla esposizione superiore agli agenti atmosferici del conducente del ciclo/motociclo rispetto a quello dell'automobile. Con l'impiego di opportuni accorgimenti, infatti, tale impatto può essere sostanzialmente ridotto.

Anche se la dimensione della flotta di M2R è inferiore al numero di autovetture, il loro contributo alla qualità dell'aria nei centri urbani è rilevante, soprattutto per le emissioni di idrocarburi (HC), poiché per questo gruppo i fattori di emissione sono superiori a quelli delle automobili [8, 9, 10] confrontano le emissioni medie di CO, HC, NOx e CO2 dei M2R con quelli delle autovetture a benzina in Svizzera. I motocicli utilizzati appartengono alla classe Euro-1, mentre le automobili alla classe Euro-3. Dallo studio risulta che le emissioni di monossido di carbonio (CO) e gli HC considerati in g/km sono molto superiori a quelle delle autovetture. Inoltre lo studio, anche se basato su un basso numero di veicoli, evidenzia come oltre la metà dei M2R violino gli standard per la categoria fissati dalla legge in Svizzera. In seguito si discute come questo sia indicativo della necessità di considerare sistemi d'ispezione e manutenzione periodica simili a quelli per le automobili.

Possiamo confrontare questi risultati con uno studio analogo eseguito un decennio prima da Chan et al. [11] utilizzando mezzi a benzina disponibili in quel periodo. Rispetto alle autovetture di vario tipo (con o senza convertitori catalitici), i motocicli emettevano 12 volte di più di HC e di CO. Le differenze nei livelli di emissione sono aumentate negli ultimi dieci anni, a sfavore dei motocicli, a causa del progresso tecnico ottenuto per la riduzione delle emissioni prodotte dalle automobili.

Ntziachristos et al., [12] conferma questi risultati. Il gruppo ateniese quantifica il contributo delle emissioni di motocicli e ciclomotori in Europa, nel periodo che va dal 1999 al 2012. Le proiezioni al 2012 indicano che, in assenza di ulteriori misure di regolamentazione, il gruppo dei M2R emette rispettivamente il 7% ed il 20% in più di CO e HC, in confronto alle emissioni del totale del trasporto su gomma. Al contrario, le emissioni di NOx (0,7%) e CO_2 (<1%) sono trascurabili, mentre per le particelle sottili (PM) si prevede un calo al di sotto dell'1% delle emissioni totali del trasporto su gomma. Il risultato più preoccupante è l'importanza relativa delle emissioni da ciclomotori e motocicli che aumenta in ambienti urbani, in particolare nei Paesi dell'Europa meridionale, che ospitano grandi flotte di mezzi leggeri su due ruote. Il problema successivo è stabilire come incorporare regole su emissioni nelle legislazioni mirate alle due ruote [13]

Mobilità a due ruote e sicurezza

I costi sociali degli incidenti stradali sono costituiti da costi umani, danni alla proprietà e ritardi nel traffico. I costi umani possono essere suddivisi in una parte connessa alla qualità della vita e un'altra legata ai diversi costi economici quali spese mediche, servizi d'emergenza, produttività perduta, assicurazione e spese legali. Occorre però distinguere la porzione esterna dei costi per vedere se, economicamente, le spese causate da un incidente siano state coperte o meno da parte di chi lo ha provocato. La porzione esterna dei costi degli incidenti dipende sia da come è strutturato il sistema assicurativo nel Paese in esame, sia dall'eventualità che siano state coinvolte anche persone diverse dal conducente.

In totale, per l'Italia, la stima dei costi provocati da incidenti e che incidono sulla collettività è pari a 30.386 milioni di euro, per il 2007. Questo rappresenta una quota notevole del PIL italiano, corrispondente al 2% [14]. Tali stime si riferiscono soltanto all'effetto complessivo della mobilità e trattano in modo identico le vittime provocate da chi guida un mezzo, di qualsiasi tipologia, pedoni e passeggeri, non considerando la causa dell'incidente. Di fatto è moralmente molto difficile sostenere la determinazione di costi esterni in funzione della tipologia del soggetto coinvolto e del mezzo utilizzato. L'eventuale "correzione" dei costi esterni degli incidenti per la modalità di viaggio è questione complessa e delicata.

Mentre il numero totale di morti per incidenti stradali è diminuito negli ultimi dieci anni in Europa, il numero degli utenti di M2R coinvolti in incidenti mortali è salito in circa la metà dei Paesi nella UE a 27. Fra il 2001 ed il 2006, in particolare, il numero di morti nel traffico fra chi guidava un M2R è diminuito in media di circa l'1,5% l'anno in tutta Europa. La scelta di utilizzare un motociclo, dunque comporta inevitabilmente l'accettazione di un grado di rischio più elevato rispetto alla guida di una automobile.

I M2R presentano caratteristiche rilevanti per il loro uso e la loro sicurezza. Rispetto alle autovetture, i M2R sono un mezzo di trasporto più economico. Per molti giovani utenti della strada, i M2R si rivelano l'unico mezzo di trasporto a motore disponibile. Ciclomotori e motocicli sono relativamente piccoli, il che li rende attraenti in zone con alta densità di traffico o congestionate, essendo più maneggevoli e più facili da parcheggiare. Le loro dimensioni ridotte e la loro posizione tra le corsie delle automobili rendono più difficile la loro individuazione e la prevedibilità dei loro spostamenti, così da poter causare incidenti. Con due ruote in linea, i M2R sono meno stabili e richiedono un grado di coordinamento corporeo e un controllo attento da parte del conducente, in

particolare a bassa velocità, in curva e in situazioni di emergenza. I M2R possono più facilmente perdere aderenza risultando, quindi, più vulnerabili soprattutto su superfici stradali di bassa qualità. La frenata è ulteriormente complicata perché la maggior parte dei ciclomotori e motocicli ha controlli separati per il freno della ruota anteriore e posteriore. Inoltre, in assenza di una carenatura estesa, i M2R offrono una minore protezione contro il maltempo ma anche contro il rischio di ferite in caso di incidente.

In seguito si riassume le tipologie di incidenti in cui sono coinvolti i M2R. Secondo uno studio finanziato dalla Commissione Europea, il tipo di collisione più frequente è quello tra un M2R e un'autovettura. Tale situazione si verifica nel 60% dei casi esaminati. Il secondo tipo d'incidente, per numero di eventi, è la collisione tra un M2R e le infrastrutture, che si verifica nel 9% dei casi. I motocicli hanno motori potenti (anche se limitati dalla legge) e, in combinazione con il loro peso ridotto, permettono una maggiore accelerazione, decelerazione e anche una velocità superiore rispetto a molte automobili [15]. L'insieme di queste caratteristiche rende la guida dei M2R potenzialmente più pericolosa dell'automobile. Allo stesso tempo, la guida di una moto dà una sensazione completamente diversa rispetto ad un'auto, elemento importante per alcuni gruppi d'utenti.

Le precedenti considerazioni mostrano come le motivazioni d'uso di un M2R possano essere diverse da quelle per l'utilizzo di un'automobile e variare tra i gruppi di utenti di M2R. Il livello di pericolo può differenziarsi tra gruppi di utenti dei M2R. Conclusioni definitive devono essere basate su dati reali sugli incidenti e su ricerche empiriche. Particolare attenzione deve essere posta nel trattare i dati quando si cerca di generalizzare risultati di studi pilota che si riferiscono a specifiche condizioni spazio-temporali.

CONCLUSIONE

Un adeguata comprensione degli effetti negativi sulla salute causato dalla mobilità a due ruote dovrebbe essere la base di qualsiasi disciplina legislativa per controllare l'utilizzo delle M2R. Ancora tale comprensione è ancora largamente carente, per quanto riguarda la modalità studiata. In generale, negli studi descritti, si nota l'importanza della velocità di guida, delle fasi del ciclo di guida e dello stato di manutenzione per determinare il grado d'inquinamento atteso dai mezzi considerati. Di fatto, è spesso rilevato come le emissioni in condizioni di guida reali, in presenza, ad esempio, di ostruzioni impreviste lungo la carreggiata, risultano superiori a quelle derivanti da misurazioni eseguite in laboratorio. Per rendere possibile una guida efficace, che sfrutti al meglio i vantaggi comparati del ciclomotore/motociclo, non si può prescindere da due elementi importanti. Il primo, riguarda la presenza di controlli e legislazioni capaci di imporre un comportamento adeguato dell'utente per evitare manipolazioni del motore o mancanza di manutenzione. Il secondo, concerne le legislazioni, ed i controlli conseguenti, che devono stimolare i produttori a tenere sempre più sotto controllo le emissioni. Attraverso varie tipologie d'incentivi le pubbliche amministrazioni sono anche in grado di indirizzare i consumatori verso la sostituzione dei veicoli più vecchi che generano una quantità preoccupante di fattori inquinanti. Un ulteriore elemento da considerare nell'analisi delle emissioni derivanti dal trasporto, é la correlazione positiva fra molti problemi di emissione e il livello di congestione urbana. Di fatto, la guida inefficace causata dalla congestione, anche se meno grave per i M2R, aggrava sia le emissioni sia il consumo di carburante.

Il presente studio ha anche evidenziato l'importanza del comportamento degli utenti dei mezzi. Infatti, molte variabili non tecnologiche risultano rilevanti per uno stile di guida "sostenibile". Forse la variabile più importante è la scelta iniziale del veicolo, ma anche l'uso che si fa del proprio mezzo costituisce un elemento importante per calcolare l'impatto in termini di costi esterni. Elementi fondamentali sono lo stile di guida, l'opportuna manutenzione ed i meccanismi di rottamazione dei mezzi. In futuro sarà interessante approfondire anche gli effetti nocivi legati al rumore in generale e a quelli collegati alla manomissione dei tubi di scarico. I costi esterni saranno, inoltre, fortemente influenzati dalla guida in condizione urbana e dall'orario.

Per quanto riguarda il controllo delle esternalità negative è auspicabile un costante miglioramento tecnologico dei veicoli, come ad esempio la dotazione di apparecchiature di controllo delle emissioni più efficaci e affidabili. E' opportuno, inoltre, un impegno ulteriore per individuare i mezzi con maggiori esternalità, prevedendo la fissazione di nuovi limiti o un'accelerazione della loro rottamazione. E' altresì necessario incentivare un'adeguata manutenzione del veicolo e disincentivare l'uso di carburanti di scarsa qualità. Tali interventi rientrano nelle competenze esclusive dei governi che dovranno adottare le necessarie politiche di attuazione. Tra i molteplici fattori da tenere in considerazione per una scelta politica adeguata, rientrano indubbiamente le esternalità. Il ruolo dell'industria nel perseguire l'obiettivo di ridurre le emissioni, gli sprechi di tempo e gli incidenti, è, al contrario, limitato. L'industria può soltanto intervenire sul miglioramento e sullo sviluppo delle tecnologie.

Inoltre, senza un immagine chiara delle variabili comportamentali associati all'uso è difficile prevedere l'impatto delle politiche. L'Italia è un caso emblematico che, con circa 10 milioni di mezzi a due ruote, rappresenta quasi il 36% dello stock totale europeo. Inoltre si è visto nell'ultimo decennio un incremento del parco di motocicli associato ad un tasso maggiore di incidenti ed inquinamento a scapito del motorino. Nonostante il ruolo centrale dello scooter vi è una mancanza notevole di studi per ampliare la conoscenza dei fattori che influenzano la domanda di utilizzo delle due ruote. Si illustra in questo lavoro la scarsa considerazione dei determinanti dell'uso dello scooter che compromette l'efficenza delle politiche proposte. Si auspica che futura ricerca approfondisce lo studio della relazione complessa fra scelta di trasporto, rischi personali e collettivi di salute e politiche di intervento pubblico.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Commissione Europea, European transport policy for 2010: time to decide, White Paper, Bruxelles, 2001.
2. International Energy Agency, Transportation Energy, Bruxelles, Belgio, 2002.
3. World Business Council for Sustainable Development, Mobility 2001: World Mobility at the End of the Twentieth Century and Its Sustainabiliy, Cambridge, Mass, 2001.
4. ACEM, Facts and figures on PTWs in Europe ACEM Yearbook 2008", rapporto disponibile online: http://www.acem.eu/cms/marketfigures.php., Bruxelles, Belgio, 2008.
5. L. Schipper, Automobile Fuel; Economy and CO2

Emissions in Industrialized Countries: Troubling Trends through 2005/6, EMBARQ, presentato al meeting annuale TRB, 2008.
6. Commissione Europea, Statistical Pocketbook: EU Energy and Transport in Figures, CE/EUROSTAT, Bruxelles, Belgio, 2002.
7. ADEME, Study of real-world emissions of Euro3 PTW Comparison with Euro4 cars, presentato a ACEM Bertrand-Olivier, DUCREUX Direction Air et Transports Département Transports et Mobilité, 2009
8. K.S. Chen, W.C. Wang, H.M. Chen, C.F. Lin, H.C. Hsu, J.H. Kao and M.T. Hu, Motorcycle emissions and fuel consumption in urban and rural driving conditions, *The Science of the Total Environment,* vol. 312, pp. 113-122, 2003.
9. R. Gense and D. Elst, Towards meaningful real-world emission factors for motorcycles: An evaluation of several recent TNO projects, 12th TAP symposium, pp. 161 - 168, INRETS, Lyon, Francia.
10. A. Vasic. and M. Weilenmann, Comparison of Real-World Emissions from Two-Wheelers and Passenger, *Environmental Science & Technology*, vol. 40(1), pp 149-154, 2006.
11. C. Chan, C. Nien, C. Tsai and G. Her, and M. Weilenmann, Comparison of tailpipe emissions from motorcycles and passenger cars. *Journal of Air Waste Management Association,* vol. 45, pp 116 –124, 1995.
12. L. Ntziachristos, A. Mamakosa, Z. Samarasa, A. Xanthopoulos and E. Iakovou, Emission control options for power two wheelers in Europe*, Atmospheric Environment*, vol. 40, pp 4547-4561, 2006.
13. R.C. Rijkeboer, D. Bremmers, Z. Samaras and L. Ntziachristos, L, Emission regulation of PTWs, rapporto finale alla Commissione Europea, FIF.20010701. TNO Report 03.OR.VM.004.1/RR, Delft, Paesi Bassi.
14. ISTAT and ACI, Incidenti stradali - Anno 2007, Pubbliacto al Salone Internazione della Sicurezza Stradale di Verona, 20 novembre, 2008.
15. MAIDS, In-depth investigations of accidents involving powered two wheelers" version 2.0, coordinato da ACEM e Comissione Europea, 2009.

RUOLO E POTENZIALITA' DEI BIOCARBURANTI NEL PANORAMA ENERGETICO MONDIALE

Flavia Reale[1]

[1]Università degli Studi Roma Tre, flavia.reale@live.it, +39/3473145633; +32/471633259

SOMMARIO

La vertiginosa crescita della produzione mondiale di biocarburanti risponde alle esigenze di: a) diversificare le fonti di energia per ridurre la dipendenza dal petrolio; b) ridurre la vulnerabilità dei Paesi importatori di fronte agli alti prezzi petroliferi; c) limitare le emissioni globali di CO_2 sostituendo i combustibili fossili con quelli di origine organica; d) stimolare l'economia del settore agricolo. Attraverso l'analisi della letteratura scientifica, si valuta l'opportunità di produrre biocarburanti di prima generazione seguendo l'approccio dei modelli di equilibrio generale. In questo studio, si indaga la sostenibilità ambientale, economica, sociale ed energetica della diffusione dei biocarburanti. Uno dei principali obiettivi è la comprensione delle ripercussioni di questa produzione sui PVS. Si conclude che i biocarburanti contribuiscono positivamente alla diversificazione delle fonti energetiche, ma che non sono in grado, allo stato tecnologico attuale, di sostituire l'offerta petrolifera mondiale. Inoltre, si evidenzia che l'estensione della produzione agricola a fini energetici può comportare gravi conseguenze da un punto di vista non solo ambientale ma, soprattutto, in termini di benessere sociale. Infine, le politiche di sostegno alla produzione dei biocarburanti non possono essere protratte nel lungo periodo perché sarebbero fonte di inefficienza economica ed allocativa. Si prevede, dunque, una graduale liberalizzazione del mercato dei biocarburanti.

1. INTRODUZIONE

L'economia mondiale dipende essenzialmente dalle fonti energetiche tradizionali. Si verifica, pertanto, una spiccata vulnerabilità di fronte all'aumento e all'instabilità dei prezzi del petrolio. Il petrolio costituisce il 42,6% dei consumi mondiali di energia [1]. Il graduale esaurimento delle sue riserve rappresenta una minaccia per la sicurezza energetica mondiale. L'esigenza di garantire gli approvvigionamenti energetici nazionali ha favorito la diffusione di energie alternative. Per questa ragione, i principali Paesi sviluppati hanno investito ampiamente nel settore delle bioenergie. Questo settore comprende l'intera produzione di energia generata dalle biomasse, intese come tutti quei materiali di origine organica, animale o vegetale, che non hanno subito alcun processo di fossilizzazione. Negli ultimi decenni, i biocarburanti, sottoinsieme delle biomasse, sono stati oggetto di una vasta attenzione internazionale. Allo stato tecnologico attuale, i biocarburanti costituiscono una delle poche alternative ai carburanti fossili nel settore dei trasporti. Questo settore consuma circa il 27% dell'energia mondiale disponibile ed impiega il 51% dei carburanti prodotti. Si prevede, per il periodo tra il 2006 ed il 2030, che il settore dei trasporti assorba l'80% dell'aumento del consumo mondiale di carburanti [2]. Si avverte, pertanto, la necessità di trovare fonti energetiche alternative al petrolio da utilizzare in questo settore.

2. PRODUZIONE: IMPLICAZIONI MONDIALI

Negli ultimi decenni si è assistito ad una vertiginosa crescita della produzione mondiale di biocarburanti. Ampie politiche di sostegno alla produzione hanno sostenuto l'offerta interna delle industrie dei principali Paesi sviluppati. Ciò ha reso possibile un ammortamento dei costi di produzione dei biocarburanti.

I maggiori produttori sono gli Stati Uniti, il Brasile e l'Unione europea, seguiti dalla Cina [Tabella 1]. Nel 2005-2006, gli Stati Uniti hanno raggiunto e superato la produzione brasiliana di biocarburanti, divenendo, così, il più grande Paese produttore al mondo. Gli Stati Uniti ed il Brasile producono principalmente bioetanolo, ottenuto da colture zuccherine ed amidacee. Le principali colture utilizzate sono la canna da zucchero, il mais, la barbabietola da zucchero ed il frumento. Questo biocarburante sfrutta, allo stato attuale, le tecnologie di conversione più mature da un punto di vista sia tecnologico, sia commerciale [3].

L'UE, invece, è il primo produttore al mondo di biodiesel. Questo estere metilico è ricavato dagli acidi grassi di oli vegetali e/o animali. Il biodiesel è prodotto principalmente da colture oleaginose quali colza, soia, palma e girasole.

I biocarburanti di prima generazione hanno dei rendimenti energetici lievemente inferiori rispetto ai carburanti tradizionali. Tuttavia, essi sono maggiormente biodegradabili e se miscelati con i carburanti tradizionali hanno delle buone rese nella tempistica di avviamento del motore [4].

Le economie emergenti forniscono il loro contributo sia producendo materia prima agricola, sia con lo sviluppo di un'industria nazionale di biocarburanti. Per quanto riguarda i Paesi meno sviluppati, essi forniscono principalmente la materia prima agricola. In questi Paesi non vi sono, infatti, le condizioni economiche e strutturali per avviare tale produzione.

Tabella 1: Produzione mondiale di biocarburanti [5]

Paese	**USA**	**Brasile**	**UE**	**Cina**	**Altri**	**Tot**
Milioni litri	28188	19227	8361	1954	4483	62213
%	45,2	30,8	13,4	3,5	7,1	100

2.1 Implicazioni Ambientali

La ricerca di energie alternative risponde all'esigenza non solo di rafforzare la sicurezza energetica nazionale, ma anche di ridurre l'impatto sull'ambiente prodotto dal consumo mondiale di carburanti.

I biocarburanti sono considerati *carbon neutral*, ciò significa che emettono un quantitativo di gas serra pari a quello catturato durante la fase di coltivazione. In questa maniera, il loro bilancio netto di emissioni è nullo. Questa caratteristica li differenzia dai carburanti di origine fossile.

La produzione di biocarburanti richiede, però, un vasto dispendio di energie (per lo più fossili) e può essere suddivisa in tre fasi: la coltivazione e raccolta delle piante, la trasformazione in carburante liquido e la diffusione sul mercato. Per valutare l'effettivo contributo energetico dei biocarburanti, è necessario considerare le emissioni prodotte in ognuna di queste fasi.

Le emissioni di gas serra non sono unicamente liberate dalla produzione e combustione dei biocarburanti, ma anche dal cambiamento dell'uso agricolo delle terre. Il processo di conversione dell'uso della terra sostituendo le colture impiegate in origine per produrre bioenergie conduce alla dispersione di CO_2 nell'ambiente.

Le principali critiche alle politiche di sostegno contestano l'effettivo contributo dei biocarburanti alla riduzione delle emissioni di gas serra. Si ritiene, infatti, che attraverso l'analisi dell'intero ciclo di vita dei biocarburanti non si registri un incisivo tasso di riduzione delle emissioni di CO_2. La categoria dei biocarburanti è, però, piuttosto ampia e, a seconda delle colture impiegate, le potenzialità energetiche ed ambientali variano sensibilmente [Tabella 2].

Tabella 2: Emissioni prodotte ed efficienza energetica [6]

Materia prima	Canna da zucchero	Mais	Colza	Soia	Benzina	Gasolio
Emissioni (Kg CO_2/MJ)	4 - 12	81 - 85	37	49	94	83
Efficienza energetica di conversione	8.0 – 10.2	1.1 – 1.25	1.8 – 4.4	1.9 - 6	0.83 – 0.85	0.8 – 0.94

La produzione di biocarburanti ha notevoli ripercussioni sulle risorse utilizzate (terra, acqua, fertilizzanti, ecc.). La loro produzione agricola richiede una grande disponibilità di terra ed un ampio impiego di risorse idriche per l'irrigazione. La sfida della ricerca moderna nel settore agricolo è l'aumento della produttività. Con una maggiore efficienza produttiva, si può soddisfare la crescita della domanda di beni agricoli. Per rispondere a questa esigenza, le principali colture bioenergetiche, come il mais, sono coltivate in piantagioni. La pratica agricola delle monocolture prevede la coltivazione di un'unica specie vegetale, in maniera intensiva e standardizzata, su una vasta area adibita alla produzione agricola. Le monocolture permettono un'alta produttività e semplificano le procedure di coltivazione. In questa maniera, è possibile ridurre i costi di produzione a favore degli agricoltori. Tuttavia, la coltura continua di un'unica specie vegetale comporta l'erosione e l'impoverimento dei suoli agricoli. Inoltre, per proteggere la produzione, è necessario l'utilizzo di ampi quantitativi di fertilizzanti e prodotti fitosanitari. Aumenta, così, l'inquinamento ambientale.

Un aumento della terra coltivata per produrre biocarburanti danneggia l'equilibrio eco-ambientale. L'incremento della produttività della terra può limitare tale fenomeno. La deforestazione comporta maggiori emissioni di gas serra nell'atmosfera. Se la ragione della produzione dei biocarburanti è il loro minore impatto ambientale, l'abbattimento di aree che collaborano al sequestro di CO_2 è controproducente. Negli ultimi decenni, le emissioni di gas serra, a causa della combustione di carburanti fossili, hanno prodotto circa il 75-85% delle emissioni totali di CO_2. La deforestazione ed altri cambiamenti nell'uso dei suoli hanno contribuito al 15-25% delle emissioni di anidride carbonica [7].

2.2 Implicazioni Economiche

I biocarburanti costituiscono un'importante possibilità di sviluppo commerciale, non solo per i Paesi sviluppati, ma anche per i Paesi in via di sviluppo (PVS). La produzione di biocarburanti, riducendo la dipendenza energetica nazionale, rafforza la stabilità economica dei Paesi importatori di petrolio. La produzione interna di biocarburanti induce un aumento dell'occupazione e della produttività nazionali, in particolare nel settore agricolo.

I PVS sono i principali produttori di materie prime agricole ed hanno, potenzialmente, un vantaggio comparato nel commercio di biocarburanti. Tuttavia, questo vantaggio è in parte ostacolato dalle limitazioni commerciali fissate dai Paesi sviluppati e da alcune barriere tecniche poste ai biocarburanti.

Per i Paesi sviluppati gli elementi riguardanti la sostenibilità economica di tale produzione sono principalmente tre: il commercio, gli incentivi e le infrastrutture. Il commercio è efficiente quando il costo di produzione dei biocarburanti ed il conseguente prezzo di mercato sono inferiori o uguali a quelli del petrolio.

Nella maggior parte dei Paesi, si è rivelato necessario l'intervento statale attraverso incentivi e sussidi alla produzione. Queste misure favoriscono sia gli agricoltori sia le industrie di trasformazione delle materie prime agricole in biocarburanti. La produzione di biocarburanti è un'opportunità per gli agricoltori di incrementare le proprie rendite. Le industrie, a loro volta, godono di ampi incentivi statali, essenziali per stimolare gli investimenti in un settore nascente e, dunque, altamente incerto. Per rendere i biocarburanti economicamente sostenibili non è sufficiente produrli, ma è necessario anche allocarli sul mercato. È necessaria un'ampia rete di distribuzione sul territorio e delle infrastrutture funzionali. Le condizioni economiche più instabili e la difficoltà di attrarre investimenti limitano la capacità dei PVS di creare un'industria bioenergetica nazionale.

Lo sviluppo di un ampio commercio di biocarburanti, che includa anche le aree più povere, richiede l'imposizione di tariffe commerciali non eccessivamente restrittive. Sinora, la necessità di tutelare il nascente mercato interno ai Paesi sviluppati ha impedito una completa deregolamentazione del commercio. Si sono previste alcune certificazioni e standard per garantire la sostenibilità ambientale della produzione bioenergetica. Queste norme restringono ulteriormente il commercio dei biocarburanti. L'assenza di queste misure, però, può ledere non solo la competitività economica delle industrie interne, ma soprattutto le norme di tutela ambientale.

L'efficienza economica della produzione dei biocarburanti dipende da numerosi fattori. Le politiche di sostegno hanno degli elevati costi [Tabella 3]. Senza questi interventi la maggior parte dei biocarburanti prodotti non sarebbe economicamente efficiente e competitiva con i prezzi petroliferi. Il costo per l'erario del sostegno ai biocarburanti è

giustificato solamente di fronte ad un incremento del benessere sociale. Nello specifico, un'effettiva riduzione di CO_2 nell'atmosfera potrebbe legittimare il costo di tali politiche perché produrrebbe delle esternalità positive a livello sociale. In termini economici ed ambientali, sono efficienti solamente i biocarburanti che in un'analisi dell'intero ciclo di vita contribuisco positivamente alla riduzione dei gas serra.

Nonostante l'ampliamento della produzione dei biocarburanti, si registra un aumento dei costi di produzione (e quindi dell'esigenza di politiche di sostegno). Ciò rafforza la necessità che i costi di tali politiche siano controbilanciati da un effettivo minore inquinamento. Generalmente, l'ampliamento della produzione conduce a costi marginali decrescenti. Tuttavia, l'attuale crescita dei prezzi energetici e di quelli agricoli rispetto ai decenni precedenti ha fatto sì che ciò non si verificasse. Il costo delle materie prime, infatti, corrisponde a circa il 55–70% dell'intero costo della produzione di biocarburanti [8].

Tabella 3: Costi di riduzione di 1 ton CO_2 eq per i Paesi OCSE [8]

Paese ($ USA)	**Etanolo**	**Biodiesel**
USA	> 450	250 – 600
UE	700 - 5500	260 – 1000

2.3. Implicazioni Sociali

La crescita del consumo globale di biocarburanti ha creato una pressione sui prezzi dei beni agricoli. A partire dal 2006 fino alla metà del 2008, i prezzi dei beni agro-alimentari sono cresciuti vertiginosamente, dando luogo a quella che è stata definita una crisi alimentare internazionale. I biocarburanti non sono l'unica causa all'origine di questa crisi, scatenata piuttosto dalla concomitanza di numerosi fattori.

I biocarburanti sono, per una parte ristretta della popolazione mondiale, un'opportunità di crescita. Per la parte restante, invece, costituiscono un rischio di peggioramento delle proprie condizioni di vita. I principali attori coinvolti nella produzione di biocarburanti sono gli agricoltori, i consumatori, lo Stato ed i produttori. Nell'analisi del benessere sociale prodotto dai biocarburanti, si constata che gli agricoltori e le industrie traggono vantaggio da tale produzione. I consumatori di beni alimentari, invece, sono svantaggiati dal rafforzamento del legame tra prezzi agricoli e prezzi energetici. Si è formato, infatti, per i beni agricoli ciò che Schmidhuber definisce un prezzo minimo ed uno massimo, in relazione al valore assunto dai prezzi energetici [9]. Per quanto riguarda i consumatori di biocarburanti, la convenienza di tale utilizzo dipende fortemente dalle politiche nazionali adottate e dall'effettivo contributo dei biocarburanti alla riduzione di gas serra nell'atmosfera.

Le Nazioni Unite affermano, però, che gli agricoltori potrebbero perdere i vantaggi di questo mercato a seguito dell'aumento del potere delle imprese di grandi dimensioni coinvolte nel settore bioenergetico. La competizione per la terra ne determina un aumento del valore. Le grandi multinazionali acquistano, dunque, una vasta parte delle terre disponibili per abbattere le economie di scala della produzione. Questo fenomeno priva gli agricoltori del vantaggio di produrre colture bioenergetiche.

Inoltre, nella prospettiva futura di una diffusione dei biocarburanti di seconda generazione, l'attenzione si sposta più sulle tecnologie che sulle materie prime. In questo caso, gli attori favoriti sono le grandi industrie detentrici degli apparati tecnologici e non più i coltivatori della materia prima agricola.

3. POLITICHE ATTUATE

La produzione di biocarburanti è accompagnata da ampie politiche di sostegno. Gli strumenti utilizzati sono principalmente: a) sostegni diretti o indiretti ad agricoltori ed industrie; b) barriere commerciali tariffarie e non tariffarie; c) controlli diretti: obblighi di miscelazione.

3.1 Brasile

Il Brasile è il pioniere nella produzione di bioetanolo derivante dalla canna da zucchero. Già nel 1931, si decretava l'obbligo di miscelazione con la benzina importata, pari al 5% [4 – 10]. Il governo brasiliano ha sempre giocato un ruolo attivo nel definire gli obiettivi della politica energetica nazionale, regolando i sussidi e gli obblighi di miscelazione della benzina con l'etanolo a seconda dei prezzi del petrolio e di quelli dello zucchero. Dagli anni '70 in poi, a seguito della crisi petrolifera, la produzione di biocarburanti viene rafforzata dal programma *Proalcool* del 1975. Con questo programma, il Brasile ha inteso a) ridurre le proprie importazioni di petrolio, all'epoca pari all'80% del consumo totale, e garantire la sicurezza degli approvvigionamenti energetici [11]; b) stimolare l'economia delle regioni del sud, attraverso la diffusione di industrie d'etanolo, alzando così il livello d'occupazione; c) sviluppare l'economia nazionale, sfruttando terra e risorse sino ad allora inutilizzate; d) stimolare la domanda interna di beni capitali quali, in particolare, i macchinari industriali [10]. L'intervento statale a sostegno del prezzo dell'etanolo ha garantito a questo carburante la competitività di mercato con la benzina. Inoltre, il governo brasiliano ha elargito cospicui finanziamenti per la creazione sia di nuove distillerie, sia di una rete capillare di distribuzione.

Attualmente, non vi sono sussidi diretti alla produzione di etanolo, ma obblighi di miscelazione che variano annualmente tra il 20% e il 25%, costituisce un incentivo indiretto [3 - 4]. Il governo brasiliano protegge il mercato interno dello zucchero e del bioetanolo attraverso l'applicazione di barriere commerciali. Lo zucchero importato subisce una tassazione aggiuntiva del 20%, mentre per il bioetanolo d'importazione ne è prevista una del 30%. Tuttavia, le eccezioni non mancano. Infatti, i Paesi del MERCOSUR[1] godono di una tariffazione preferenziale per le esportazioni verso il Brasile.

Le esportazioni brasiliane sono state favorite, in questi anni, da speciali accordi bilaterali, in particolare con i Paesi asiatici.

Recentemente, il governo ha applicato una serie di misure volte al sostegno della produzione, quali:

- una tassazione ridotta sulla produzione di bioetanolo,
- una tassazione ridotta sui veicoli alimentati a bioetanolo e su quelli *flex-fuel* [3 - 4],
- finanziamenti all'industria per l'aumento delle scorte di zucchero, in maniera tale da stabilizzare e garantire gli approvvigionamenti di bioetanolo [4].

Il governo brasiliano ha stimolato la domanda di biocarburanti tramite incentivi all'acquisto di veicoli *flex-fuel*. Queste vetture possono essere alimentate sia con biocarburanti o con carburanti fossili, sia con entrambi in miscelazioni variabili. I

[1] Mercato Comune del Sud (America Latina). I Paesi aderenti sono Brasile, Argentina, Paraguay, Uruguay e Venezuela.

veicoli *flex-fuel* godono di una tassazione preferenziale, che ha permesso loro di raggiungere, nel 2008, circa il 90% del totale dei veicoli venduti [12].

Dal 2004, il Brasile ha iniziato a produrre anche il biodiesel. La forte domanda interna ha fatto sì che il governo stabilisse, già per il 2008, un obbligo di miscelazione del biodiesel con il gasolio pari al 2%. In realtà, questo mandato è stato anticipato al 2006 [4]. Entro il 2013, si è prevista una percentuale di miscelazione pari al 5%, con un raggiungimento del 20% nel 2020 [13]. Queste politiche sono rese possibili dalla spiccata capacità del Brasile di sviluppare rapidamente l'industria bioenergetica.

In conclusione, il mercato bioenergetico brasiliano ha raggiunto l'efficienza grazie alla profonda integrazione del mercato energetico con quello agricolo. I prezzi dello zucchero seguono i prezzi petroliferi, in virtù del legame tra bioetanolo e petrolio [10]. Tutto ciò è reso possibile dalla vasta diffusione dei veicoli *flex-fuel*. Essi permettono, infatti, la flessibilità nella scelta dei consumatori a favore del bene economicamente più conveniente. I prezzi delle bioenergie devono, pertanto, rimanere contenuti, se intendono essere competitivi con quelli petroliferi.

3.2 USA

A partire dagli anni settanta, Gli Stati Uniti hanno indirizzato le proprie politiche nazionali e federali verso il sostegno ai biocarburanti.

Nel 2004, l'*American jobs creation act* ha sostituito la riduzione delle accise sui carburanti con crediti sull'imposta di produzione. Per il bioetanolo si è stabilito fino al 2010 un incentivo fiscale pari a $0,13 per litro. Nel caso del biodiesel l'incentivo oscilla tra i $0,13 e $0,26 al litro, a seconda della materia prima utilizzata. Questo provvedimento, previsto fino al 31 dicembre 2008, è stato prolungato di un anno [4]. Un passo importante è stato compiuto nel 2005 con *l'Energy policy act* che ha previsto, tra le molte misure, il *Renewables Fuel Standard* (RFS). Ha stabilito il raggiungimento, entro il 2006, di un consumo interno minimo di biocarburanti pari a 15 miliardi di litri, che deve poi crescere fino a 28,4 miliardi nel 2012 [14]. Inoltre, a partire dal 2013, vengono ad aggiungersi anche 946 milioni di litri di biocarburante originato da biomassa lignocellulosica. Tra gli incentivi ai piccoli produttori di biocarburanti, l'RFS prevede un credito di imposta sul reddito pari a $0,03, per ogni litro prodotto in impianti con una limitata capacità di produzione [4]. Nel caso del biodiesel, l'incentivo viene erogato solo per le prime 50.000 tonnellate prodotte, mentre per il bioetanolo si estende fino alle prime 90.000. Il credito massimo previsto è pari a 1,5 milioni di dollari all'anno. Infine, questa legge prevede un credito di imposta del 30% a favore di chi investe in impianti di rifornimento di biocarburanti. Questa misura fiscale è disponibile solo per le strutture destinate a veicoli ad alta percentuale di biocarburanti (>20%).

Nel 2007, è stato emendato il *Clean Air Act* con l'*Energy Independence and Security Act* (EISA). Con lo slogan "twenty in ten" si è dichiarata la volontà di ridurre del 20% il consumo di benzina in dieci anni (2007-2017) [14]. Si prevede un aumento della produzione dei carburanti di origine organica, dai 34 miliardi di litri del 2008 ai 136 miliardi nel 2022 [13]. A favorire l'attuazione di queste politiche, vi è la crescente diffusione di veicoli alimentati unicamente a biocarburanti e, ancor di più, di veicoli *flex-fuel*. Questa tipologia di vetture ha goduto di incentivi fiscali che ne hanno aiutato la diffusione commerciale.

La tutela del mercato interno e, quindi, dei produttori nazionali ha richiesto l'imposizione di tariffe e dazi all'importazione sia dei biocarburanti, sia delle materie prime da cui sono ottenuti. Le importazioni di bioetanolo sono sottoposte ad una tariffa ad valorem del 2,5% e ad un dazio pari a circa $0,12 per litro [4]. Tuttavia, le eccezioni non mancano. I Paesi dell'America centrale e dei Caraibi hanno siglato degli accordi speciali con gli Stati Uniti, che permettono loro un trattamento preferenziale. Il *Caribbean basin economic recovery act* prevede che il 7% del bioetanolo proveniente da questi Paesi e quello prodotto almeno al 50% con materiale proveniente da questa area geografica, non siano sottoposti ad alcun dazio [4 - 11].

La crescita della domanda di bioetanolo è stata stimolata anche da alcune politiche ambientali. L'*Oxigenated fuels program* e il *Reformulated gasoline program* impongono una percentuale minima di ossigeno nella benzina pari al 2%. Gli ossigenatori possono essere sia di origine chimica, come l'MTBE, sia organica, come l'ETBE. Le legislazioni di molti stati federali hanno bandito l'utilizzo dell'MTBE e hanno, dunque, favorito indirettamente la crescita della domanda di ETBE. In maniera analoga, l'*Environmental protection agency* ha predisposto la diminuzione del contenuto di zolfo presente nel gasolio, inducendo un aumento della domanda di biodiesel come additivo.

Le politiche americane hanno incentivato le esportazioni di biodiesel, attraverso la liberalizzazione del suo mercato. Infatti, gli USA hanno destinato incentivi fiscali alla produzione di biodiesel anche a chi lo importa come prodotto finito o chi ne importa le materie prime al fine di produrlo negli Stati Uniti. Le tariffe all'importazione di biodiesel sono, infatti, molto limitate, pari al 4,6%. Questo meccanismo ha notevolmente ampliato la produzione americana di biodiesel.

In conclusione, l'elevato livello di produzione, previsto dagli obiettivi politici, è stato reso possibile dai numerosi impianti industriali presenti sul territorio. L'industria del bioetanolo, rispetto agli anni novanta, ha ridotto il proprio livello di concentrazione monopolistica. In questi anni, infatti, molti nuovi gruppi societari sono entrati nel mercato. Il settore della distribuzione, invece, rimane ancora decisamente controllato da un numero ristretto di società [4].

3.3 UE

Il Protocollo di Kyoto è un quadro di riferimento generale per le politiche di abbattimento delle emissioni. A livello interno, la UE ha attuato diverse politiche comunitarie per incentivare lo sviluppo di tecnologie moderne con un impatto ambientale minore. A partire dalla metà degli anni novanta, è cresciuto l'interesse per le energie rinnovabili. Nel 1996, infatti, la Commissione europea ha adottato il Libro Verde "Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili" per raggiungere nel 2010 un consumo di energie rinnovabili pari al 12%. In questo contesto, la UE ha iniziato il proprio percorso di sostegno ai biocarburanti. La direttiva comunitaria 2003/30/CE ne promuove l'uso, poiché l'energia impiegata nel settore dei trasporti rappresenta oltre il 30% del consumo finale di energia e produce il 21% delle emissioni di gas serra della UE. Il sostegno alla diffusione dei biocarburanti è giustificato dalle previsioni di un'ampia espansione del settore dei trasporti.

Le ragioni a sostegno di queste politiche sono la volontà di rispettare gli impegni presi a Kyoto e l'interesse nella graduale riduzione della dipendenza energetica dal petrolio. Oltre alle giustificazioni di natura ambientale, le politiche relative alle

bioenergie rappresentano uno stimolo all'economia agricola ed offrono la possibilità di accrescere il tasso di occupazione in questo settore. Per il 2005, la direttiva prevedeva un obiettivo di consumo di biocarburanti pari al 2% del totale dei carburanti consumati all'interno dei Paesi membri. Solamente Germania, Francia ed Austria hanno rispettato questo obiettivo. Entro la fine del 2010, la quota di biocarburanti impiegati dovrebbe raggiungere il 5,75%.

La direttiva 2003/96/CE sulla tassazione dell'energia, si affianca alla direttiva 2003/30/CE, riservando un regime fiscale preferenziale per i biocarburanti rispetto a quello previsto per i carburanti fossili. Queste misure incentivano la produzione e distribuzione di biocarburanti a livello nazionale.

La direttiva 2009/28/CE pone degli obiettivi vincolanti di raggiungimento del 20% di energie rinnovabili per il 2020. Entro questa data, il settore dei trasporti dovrebbe ricoprire il 10% delle energie rinnovabili impiegate. Questa direttiva prevede una graduale riduzione delle emissioni di gas serra prodotte dal settore dei trasporti pari all'1% annuo, a partire dal 2011. Si raggiungerebbe così, nel 2020, un abbattimento del 10%. Gli strumenti per rispettare tali obiettivi, oltre ad una maggiore commercializzazione dei biocarburanti, sono il sostegno alla diffusione dei veicoli elettrici e di quelli a ridotto impatto ambientale.

L'Ue ha imposto delle barriere tariffarie alle importazioni di biocarburanti per stimolare l'offerta interna. Tuttavia, l'UE ha sancito degli accordi speciali non permanenti con alcuni PVS. Tra questi, i Paesi dell'America Centrale e delle Ande e quelli dei Balcani occidentali [11]. Questi Paesi sono stati favoriti perché hanno applicato sia misure positive di sviluppo sostenibile, sia delle buone politiche di governo.

Le politiche comunitarie relative ai biocarburanti sono andate in parallelo con quelle attuate nel settore agricolo, nel quadro della Politica Agricola Comune (PAC). Il regolamento orizzontale 1782/2003 della riforma Fischler prevede il mantenimento del regime di deroga alla coltivazione di colture energetiche su terreni *set-aside* e, soprattutto, la possibilità di usufruire di sussidi per i produttori di tali colture [4]. I terreni *set-aside* sono superfici ritirate dalla coltivazione agricola ad uso alimentare, sottoposte a particolari vincoli. Nel quadro della riforma del 2003, la misura più importante è il disaccoppiamento totale del sostegno ai produttori. Questa misura elimina il legame tra aiuti statali e tipologia di prodotti coltivati, favorendo indirettamente le colture bioenergetiche. Infatti, gli agricoltori intenzionati a destinare parte delle superfici coltivate ad uso bioenergetico possono continuare ad usufruire del sostegno derivante dal pagamento unico[2], attribuito loro sulla base degli aiuti ricevuti negli anni precedenti al 2003. Inoltre, l'UE ha previsto un sussidio supplementare accoppiato, pari a 45 euro per ettaro, per la coltivazione di colture bioenergetiche.

Il regolamento 73/2009 del Consiglio ha abrogato definitivamente l'obbligo di destinazione del 10% delle superfici agricole al ritiro dalla produzione ed il sussidio specifico per le colture energetiche è stato cancellato. La giustificazione di tale scelta in ambito comunitario sono i recenti sviluppi nel settore delle bioenergie e, in particolare, la forte domanda di tali prodotti sui mercati internazionali. Le ampie politiche comunitarie a sostegno della produzione e la fissazione di obiettivi vincolanti relativi alle quote di bioenergie entro il 2020, fanno sì che un aiuto specifico per tali colture non sia più opportuno.

3.4 Prospettive per i Mercati Internazionali

La produzione di biocarburanti in Brasile, nell'Unione europea e negli Stati Uniti non è priva di ripercussioni sui mercati internazionali. L'incremento della produzione di bioenergie non riguarda solamente i Paesi sviluppati che le consumano, ma anche molti dei PVS che ne forniscono la materia prima agricola. Queste politiche di produzione, inoltre, hanno effetti non trascurabili sui rapporti tra gli stessi Paesi sviluppati. Le barriere commerciali poste dall'Unione europea alle importazioni di biodiesel prodotto in America, ne sono un valido esempio. Gli ampi sussidi statali rendono possibile un prezzo del biodiesel americano molto competitivo. Le industrie produttrici europee si sono, quindi, dovute confrontare con prezzi concorrenti molto più bassi. Questo fenomeno ha portato le autorità europee a proteggere il nascente mercato interno di biodiesel, imponendo delle misure d'imposta *anti-dumping* sulle importazioni di questo carburante dagli USA. L'ammontare totale del dazio oscilla tra i □213 ed i □409 per tonnellata. Questa misura si aggiunge al 6,5% di base, applicato alle importazioni di biodiesel come prodotto finito.

Le misure applicate non hanno aiutato i rapporti tra Stati Uniti ed Unione europea e, in generale, le politiche sui biocarburanti hanno chiamato in causa anche molte organizzazioni internazionali. La classificazione dei biocarburanti nella corretta categoria di beni commerciati internazionalmente non è semplice. I biocarburanti derivano da beni agricoli, sono prodotti energetici e potrebbero anche rientrare, nel caso dell'etanolo, nella categoria dei liquidi con alto tasso alcolico. Le barriere tariffarie al commercio dei biocarburanti non sono riuscite, soprattutto nella prima fase, a tassare tutti i biocarburanti in uguale misura.

La vasta richiesta di beni agricoli potrebbe favorire il commercio dei PVS. Essi, infatti, hanno grandi potenzialità nella produzione agricola. I Paesi sviluppati, invece, hanno una disponibilità di terra coltivabile piuttosto limitata. Per questa ragione, in una prospettiva di lungo periodo, si può immaginare un aumento della produzione agricola dei PVS per soddisfare le esigenze bioenergetiche dei Paesi sviluppati. L'aumento delle importazioni dai PVS è necessario anche per alleggerire il peso fiscale delle politiche di sostegno alla produzione interna. Alcuni autori sostengono la necessità di liberalizzare il mercato bioenergetico, per permettere anche ai PVS di divenire esportatori di biocarburanti e non solo di materie prime agricole. Questa visione, tuttavia, non considera pienamente le limitate capacità strutturali e di investimento di buona parte dei PVS. Tra i rischi di questa produzione, inoltre, vi è il fatto che le tecnologie e la ricerca sono in continua evoluzione. Ciò implica la possibilità di passare, a breve, alla produzione di biocarburanti di seconda generazione. In questo caso, ampi investimenti nei biocarburanti di prima generazione potrebbero avere delle ripercussioni molto negative sulle fragili economie dei PVS.

In termini quantitativi, data la limitata disponibilità di terra, la produzione europea non può crescere ancora molto. Di fronte ad impianti con grandi potenzialità, è pertanto previsto un forte incremento delle importazioni europee di materie prime agricole. Rajagopal e Zilberman ipotizzano il potenziale contributo delle sei principali colture bioenergetiche nella sostituzione della benzina [3]. Queste colture ricoprono il 43%

[2] Il pagamento unico è un aiuto attribuito agli agricoltori indipendentemente dalla loro produzione. Questo regime di sostegno è stato introdotto per garantire stabilità al reddito degli agricoltori e per migliorare la competitività e la sostenibilità dell'agricoltura europea.

della terra coltivata a livello globale[3]. Dai dati emerge che, se si utilizzasse l'intera produttività di queste coltivazioni per produrre biocarburanti, sarebbe possibile sostituire l'85% del consumo globale di benzina (pari a 1.100 miliardi di litri, nel 2003). Tuttavia, gli autori stessi sostengono che questo scenario non sia plausibile. Il conflitto tra uso *food* e quello *fuel* dei terreni minaccerebbe la sicurezza alimentare mondiale. Lo studio indica che, se si utilizzasse il 25% della produzione agricola di queste colture a scopo energetico, la riduzione della domanda di benzina sarebbe pari al 21%. Altri studi ritengono che Canada, Stati Uniti ed UE[4] dovrebbero impiegare il 30-70% della loro produzione agricola ad uso energetico, per sostituire il 10% del consumo interno di benzina. Rajagopal e Zilberman riconoscono la limitatezza di questi dati, per l'assenza di valutazioni integrative di tipo economico ed ambientale.

4. CONCLUSIONI

Il lavoro svolto indaga l'effettiva capacità dei biocarburanti di sostituire il petrolio e le caratteristiche della loro produzione. Allo stato attuale i biocarburanti costituiscono il 2-3% dei carburanti liquidi mondiali [2]. Nel 2007, i biocarburanti hanno ricoperto più dell'1,5% del consumo mondiale di carburanti per il trasporto. La loro coltivazione ha coinvolto meno del 2% delle terre arabili a livello mondiale [8]. Essi non sono, dunque, in grado di rappresentare un'alternativa concreta al petrolio. La produzione e diffusione dei biocarburanti è utile in una prospettiva di diversificazione delle fonti energetiche. Tuttavia, non è possibile ritenere che essi siano una soluzione alla dipendenza energetica dal petrolio. L'impiego di analisi LCAs (*Life-Cycle Analysis and Assessment*), relative all'intero ciclo di vita dei biocarburanti, costituisce un utile strumento per valutare la loro effettiva sostenibilità ambientale ed energetica. Questi modelli di analisi studiano la capacità dei biocarburanti di ridurre le emissioni di CO_2, in quanto ciò ne giustifica il sostegno alla produzione di fronte all'opinione pubblica. Per questa ragione, è essenziale comprendere il loro effettivo impatto ambientale e quindi l'opportunità della loro produzione. Tuttavia, la diffusione dei biocarburanti coinvolge numerosi settori dell'economia, rendendo alquanto difficoltosa una valutazione precisa delle implicazioni di lungo periodo. L'evoluzione della tecnologia condurrà probabilmente ad un superamento dei biocarburanti attualmente in commercio con quelli di seconda generazione. L'incertezza nell'evoluzione futura di questo mercato comporta notevoli rischi d'investimento. Nella prospettiva di un'efficienza energetica, ambientale ed economica, è essenziale il raggiungimento graduale della liberalizzazione dei mercati bioenergetici. In questa maniera, si perviene sia ad un'allocazione delle risorse mondiali più efficiente, sia ad una riduzione sostanziale dei costi di produzione.

[3] La superficie globale coltivata è pari a 1,4 miliardi di ettari.
[4] Riferimento all'Unione europea a 15 Paesi (prima del 2004).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. J.Y. Garnier, Key World Energy Statistics 2009, International Energy Agency (IEA), Paris, 2009.
2. Energy Information Administration (EIA), International Energy Outlook (IEO) 2009, Rept. DOE/EIA-0484, Washington, May 2009.
3. D. Rajagopal and D. Zilberman, Review of Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels, The World Bank Development Research Group Sustainable Rural and Urban Development Team, Policy Research Working Paper Rept. 4341, Sept. 2007.
4. A. Zezza, Bioenergie: quali opportunità per l'agricoltura italiana?, Inea - Studi e Ricerche - Esi, Napoli, 2008.
5. K. Wiebe et al., The State of Food and Agriculture. Biofuels: prospects, risks and opportunities, Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Roma, 2008.
6. M.J .Groom, E.M. Gray, P.A. Townsend, Biofuels and Biodiversity: Principles for Creating Better Policies for Biofuel Production, *Conservation Biology*, vol.22, n.3; pp. 602–609, 2007.
7. M. Karlsson, Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Makers, UN-Energy, Apr. 2007.
8. R. Sims, M. Taylor, J. Saddler and W. Mabee, From 1st to 2nd generation biofuel technologies. An overview of current industry and RD&D activities, International Energy Agency (IEA) – OECD, Paris, Nov. 2008.
9. J. Schmidhuber, Domanda di bioenergia, mercati agricoli e sicurezza alimentare, QA - *Rivista dell'Associazione Rossi Doria*, vol.1, pp. 33-70, 2008.
10. A. Hira and L.G. De Oliveira, No substitute for oil? How Brazil developed its ethanol industry, *Energy Policy*, vol.37, n.6, pp. 2450-2456, 2009.
11. M.J Jank., J. Kutas, L.F. do Amaral, A.M. Nassar, EU and U.S. Policies on Biofuels: Potential Impacts on developing Countries, The German Marshall Fund of the United States (GMF), Washington, 2007.
12. Energy Information Administration (EIA), Overview Brazil, Sept. 2009.
13. R. Brmnlund, B. Kristrdm, T. Lundgren, P-O Marklund, The economics of biofuels, *International Review of Environmental and Resource Economics*, vol. 2, pp. 237–280, 2008.
14. R. Esposti, Food, feed & fuel: Biocarburanti, mercati agricoli e politiche, Working Paper n. 10, quaderni del Gruppo 2013, ed. Tellus, Roma, Nov. 2008.

ROAD SURFACE MARKINGS' PERFORMANCE: MONITORING AND INNOVATION

F. Asdrubali, C. Buratti, E. Moretti, F. D'Alessandro, S. Schiavoni

CIRIAF, Interuniversity Center of Research on Pollution by Physical Agents,
University of Perugia, Via G. Duranti, 67, 06125 Perugia - ITALY

SUMMARY

The unit of Perugia of CIRIAF (Interuniversity Center of Research on Pollution by Physical Agents), in cooperation with the municipality of Perugia, has started a research project aiming at defining a modus operandi for in-situ measurements able to take into account the characteristics of the site of installation of road marking in order to:

- optimize the maintenance;
- give the municipalities a tool to verify the quality of the application, in order to assess if the requirements given in tenders are fulfilled.

The activity is performed within the framework of the EU co-funded project CIVITAS Plus "RENAISSANCE", involving five municipalities of five EU state members. The project aims at testing and developing innovative transport strategies in historic cities (see the website of the project www.civitas.eu).

The paper, after the first sections about the state of the art of materials used for road markings and the methodology for the evaluation of their performance, reports the results of a first experimental campaign carried out on several roads of the municipality of Perugia.

THE CIVITAS+ "RENAISSANCE" PROJECT

The Project "RENAISSANCE" (full title: "Testing Innovative Strategies for Clean Urban Transport for historic European cities") is co-funded by the European Union within the 7th Framework Programme CIVITAS Initiative (Plus edition 2008-2012).

The goal of the project RENAISSANCE is to develop a valid, reliable and integrated package of access and mobility measures for historic cities.

RENAISSANCE cities are five historic cities from across Europe, in the vanguard of sustainable development. The cities are in sites having in common strong reliance on heritage and tourism, which must combine environmental concerns, mobility and economic development.

The cities involved in the project are:

- Perugia (ITALY) – Project Leader (see fig. 1);
- Bath (UK);
- Szczecinek (Poland);
- Gorna Oryahovitsa (Bulgaria);
- Skopje (Republic of Macedonia).



Figure 1: logo of CIVITAS RENAISSANCE for the city of Perugia.

The activities are performed by the five cities in cooperation with other 25 partner companies and research organizations expert in the field of transport and mobility.

The 4-years project has started in September 2008.

Within the framework of the measure 5.2 of the project "Assessing the options for more efficient road pavement markings", the unit of Perugia of CIRIAF (Interuniversity Center of Research on Pollution by Physical Agents), in cooperation with the municipality of Perugia, has focused the research activities on the study of the performance of road surface markings.

The incidence of pavement marking on traffic safety and driving comfort is considerable.

Efficiency and durability of road horizontal marking are strongly required both from the users and the administrators. From the users' point of view pavement marking provides an optical path by means of an adequate contrast of colour and luminance with the road surface, while costs and performances influence the administrators' choices, especially as far as the planning of maintenance.

The activities of CIRIAF can be summarized as follows:

- survey on the state of the art on materials used for road markings;
- survey on the state of the art on methodology used for evaluating the performance of road markings;
- selection of the most suitable instruments for evaluating the performance of road markings;
- selection of the sites of measure along the road network of the municipality of Perugia, taking into account different types of material, asphalt and traffic flows;
- experimental campaign on the selected sites.

These activities aim at defining a modus operandi for in-situ measurement able to take into account the characteristics of the site of installation of road marking, in order to:

- optimize the maintenance;
- give the municipalities a tool to verify the quality of the application in order to assess if the requirements given in

tenders are fulfilled.

This second aspect is particularly important for public administrations: as a matter of fact the current evaluation of the performance of road surface markings performed by the Municipality of Perugia is made purely by verifying the products used in terms of quantity, and by visual judgment of the amount of paint used, without any experimental support.

PARAMETERS FOR THE EVALUATION OF ROAD MARKINGS' PERFORMANCE

In the European Union, the evaluation of the performance of road markings was introduced in August 1997, following the withdrawal of the English BS 3262.

The standards related to road markings are:

- EN 1436 – Road Marking Performance for Road Users;
- EN 1463 – Retro reflecting Road Studs;
- EN 1790 – Preformed Road Markings;
- EN 1824 – Road Trials;
- EN 1871 – Physical Properties;
- EN 1423 – Glass Beads, Aggregates and mixtures;
- EN 1424 – Premix glass beads.

In particular, EN 1436 specifies the performance for the road user of white and yellow road markings based on luminance (colour), day-time visibility, night-time visibility and skid resistance combined with durability. The specification also introduces the importance of wet-night visibility road markings. Furthermore, it also describes the methods of measuring the various performance characteristics.

The road marking characteristics are as follows:

1) Reflection in daylight or under road lighting Q_d.

Luminance is the property of the marking which describes the brightness of its colour.

Q_d measures, true to scale, the luminance (day visibility) of a road marking. The observation angle of 2,29° corresponds to the viewing distance of a motor car driver of 30 m under normal conditions (see fig. 2). The illumination is diffused light.

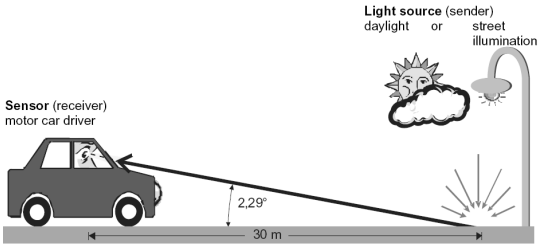


Figure 2: scheme of the measurement conditions for Q_d.

2) Retroreflection under vehicle headlamp illumination R_L.

Retroreflection is the ability of a road marking to reflect light from a vehicle's headlights back to the driving position of a vehicle. Initially it will be determined by the amount of glass beads spread on the line. The continuing performance of the line is determined by the amount and quality of glass beads included in the body of the road marking.

R_L measures, true to scale, the retroreflection (night visibility) of a road marking. The observation angle of 2,29° corresponds to the viewing distance of a motor car driver of 30 m under normal conditions. The illumination angle is 1,24° (see fig. 3).

R_L is measured in three different conditions of road markings: dry, wet and rain.

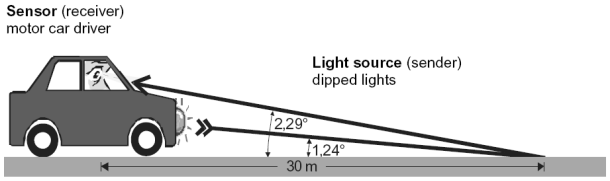


Figure 3: scheme of the measurement conditions for R_L.

3) Colour.

It is defined by the luminance factor β and chromaticity, defined as the co-ordinates to fall within a defined square on the chromaticity diagram (see fig. 4).

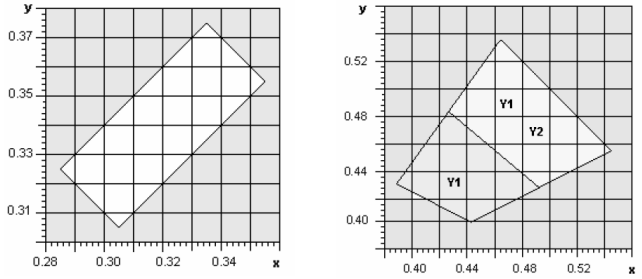


Figure 4: chromaticity vertexes defined by EN 1436 for white (left) and yellow (right) road markings

4) Skid Resistance SRT.

Skid resistance measurement on road markings is carried out using the standard British pendulum apparatus. The units of measurement quoted in EN 1436 are followed by the abbreviation SRT. The skid resistance of freshly applied road markings tends to increase in value due to the effects of trafficking and weathering. For skid resistance, emphasis is sometimes placed on those road markings which occupy a large percentage of the trafficked areas such as zebra crossings, arrows, transverse markings, text and symbols.

Table 1 reports the classes of performance for each parameter, as defined by EN 1436 for white and yellow on asphalt pavements; other values are referred to concrete surfaces.

Table 1: requirements for white (a) and yellow (b) road markings' performance.

a)

R_L (dry conditions) mcd/ (m^2·lux)		R_L (wet conditions) mcd/(m^2·lux)		Q_D mcd/(m^2·lux)		SRT	
Class	Value	Class	Value	Class	Value	Class	Value
RO	NIL	RW0	NIL	Q0	NIL	SO	NIL
R2	≥ 100	RW1	≥ 25	Q2	≥ 100	S1	≥ 45
R3	≥ 150	RW2	≥ 35	Q3	≥ 130	S2	≥ 50
R4	≥ 200	RW3	≥ 50	Q4	≥ 160	S3	≥ 55
R5	≥ 300	RW4	≥ 75			S4	≥ 60
		RW5	≥ 100			S5	≥ 65
		RW6	≥ 150				

b)

R_L (dry conditions) mcd/(m^2·lux)		R_L (wet conditions) mcd/(m^2·lux)		Q_D mcd/(m^2·lux)		SRT	
Class	Value	Class	Value	Class	Value	Class	Value
R0	NIL	RW0	NIL	Q0	NIL	S0	NIL
R1	≥ 80	RW1	≥ 25	Q1	≥ 80	S1	≥ 45
R3	≥ 150	RW2	≥ 35	Q2	≥ 100	S2	≥ 50
R4	≥ 200	RW3	≥ 50	Q3	≥ 130	S3	≥ 55
		RW4	≥ 75			S4	≥ 60
		RW5	≥ 100			S5	≥ 65
		RW6	≥ 150				

MATERIALS AND TECHNOLOGIES: STATE OF THE ART

As previously said, the performance of road markings in terms of retro reflectivity is determined by the amount and quality of glass beads included in the material (see figure 5).

Glass beads have usually diameters around one-tenth, one-hundredth of millimeter; they can be pre-mixed in the marking material or post-sprayed on the surface of the material after its installation.

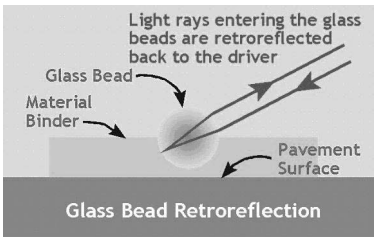


Figure 5: retroreflection of glass beads.

There are four basic road marking materials, all of them using glass beads to improve retro reflectivity properties.

Paint: it is the most used road marking system in the world. It does not require heating and can be applied very quickly at speeds up to 15 km/h, it has little build up and an affinity to glass beads. This road marking system can be applied generally from May until October because of the weather conditions. Traffic paints are available with a variety of solvents (alkyd resin, rubber, modified alkyd) and water-borne. Solvent-borne paints are very durable with respect to water-borne, but have an higher content of VOC (around 440 g/l vs. 150 g/L). Glass beads are either pre-mixed into paint or dropped while the paint is wet. Water-borne are much easier to handle than solvent paints but wear off rapidly and lose reflectivity quickly. Therefore paint are not suitable for high-volume roadways but for nondurable markings. Expected service life is around ½ to 1 year while retro reflectivity is within the range of 140-250 mcd/(lux·m^2).



Figure 6: installation of paint stripes.

Thermoplastic: it is a durable pavement marking material, composed of glass beads, pigments, binders (plastics and resins) and fillers. There are two types of thermoplastics: hydrocarbon and alkyd. Thermoplastic road markings are solid at ambient temperatures, so they must be melted for the application (at least at 200°C). They do not contain solvents and have an application speed of around 5 km/h and a thickness from 1.5 to 3 mm. A correct installation requires a proper surface cleaning, the removal of the moisture; it is recommended not to apply thermoplastic materials on cold pavements surfaces (poor adhesion may occur). Moreover these materials can be re-applied over older thermoplastic marking, they perform very well on all types of asphalt surfaces but a loss of material may occur from snow-removal operation. Expected service life is around 2 to 7 years (strongly depending on formulation and installation), while retro reflectivity is within the range of 80-120 mcd/(lux·m^2).

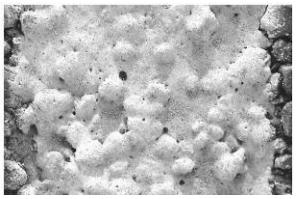


Figure 7: thermoplastic road marking.

Two-components: these materials are produced on site through the reaction of two chemical reactants. The first component contains epoxy resin, pigment, extenders and fillers, while the second component acts as a catalyst to accelerate setting time. Epoxy resin may be substituted with polyester, polyurea or methacrylate. All these materials have a low VOC content. Epoxy-based marking materials have a service life until 4 years, but discolour with age; they have a drying time in most cases higher than 40 minutes. Methyl Methacrylate-based markings have to be applied slowly (5 km/h) and need a cure time of about 30 minutes; nevertheless this system has a very high retro-reflectivity and a service life up to 10 years. Polyurea-based marking materials have a faster drying time, need a short cure time (3 to 8 minutes); they may be also applied at low pavement surface temperatures (as low as 0°C) and are not affected by humidity.

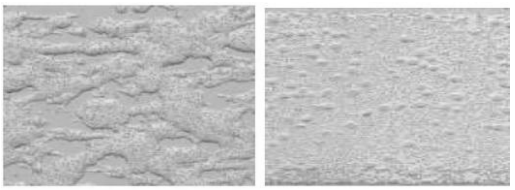


Figure 8: two-components road markings: methacrylate (left) and polyurea (right) based materials.

Preformed road markings or Tapes: these materials are available in several performance levels and types, both permanent and temporary. The marking can be applied to existing pavement rolled into hot surfaces, or placed in prepared grooves. It needs a proper pavement surface preparation, a slow application and has a cost which is 5 to 10 times higher than thermoplastic. Glass beads are incorporated into material during factory manufacturing. Nevertheless tapes have a service life longer than others marking systems and an excellent retro-reflectivity (300-1000 mcd/(lux·m^2)).



Figure 9: road marking tape

MEASUREMENT SET-UP

The optimal measurement set-up and conditions have been defined after a in-depth survey on the state of art of laboratory and in situ measurements for the characterization of the optical properties of road markings. It has allowed to pick and choose the most suitable instrumentations complying to the European standards. The equipment is described in the following sections.

Retroreflectometer Zehntner ZRM6013 R_L+Q_d

The Zehntner-retroreflectometer ZRM 6013 measures the night visibility (R_L) of road markings as seen by a vehicle driver with dipped headlight. The illumination simulates the dipped headlights of a vehicle. The day visibility (Q_d) of road markings under typical or average daylight or under street lighting is measured with diffused illumination. This makes an objective determination of night (R_L) and day visibility (Q_d) of road markings in compliance to EN 1436, of ambient temperature as well as of relative humidity in dry or wet condition, at any given time of day or night, on the road or in the laboratory for all types of road markings paints, marking tapes, thermoplastic and cold plastic materials - whether smooth, textured, profiled, coloured, with or without aggregates and reflective beads.



Figure 10: Retroreflectometer

Road marking control kit Zehntner ZMK5051

The kit includes the complete range of measuring and testing instruments required for control checks on road markings:

- 1 thickness gauge, 100 µm to 950 µm, in steps of 25 µm;
- 1 insertion thermometer, -10°C to +200°C;
- 1 hygrometer, 25% to 95% relative humidity;
- 1 electronic balance, 0 g to 2'000 g;
- 1 magnifying glass, 6x magnification with scale;
- 1 digital marking gauge for measuring the dry film thickness of road markings.

Portable Skid Resistance Tester Zehntner SRT 5800

The instrument, which is direct reading, gives a measure of the friction between a skidding tyre (a rubber slider mounted at the end of the pendulum arm) and a wet road surface. The quantity measured with the portable tester has been termed "Skid-resistance" and this correlates with the performance of a vehicle with patterned tyres braking with locked wheels on a wet road at 50 km/h. It can be used in laboratory or in field measurements.

Spectrophotometer Konica Minolta CM-2500c

The spectrophotometer CM-2500c, with 45/0° geometry, is a portable, hand-held spectrophotometer designed to measure, match and control the color of small, irregular surfaces as well as substrates with grain, texture or directional characteristics. It is used to measure the chromatic coordinates of road markings.



Figure 11: Portable Skid Resistance Tester



Figure 12: spectrophotometer

Infrared camera FLIR B360

An infrared camera is a non-contact device that detects infrared energy (heat) and converts it into an electronic signal, which is then processed to produce a thermal image on a video monitor and perform temperature calculations. Heat sensed by an infrared camera can be very precisely quantified, or measured, allowing to not only monitor thermal performance, but also to identify and evaluate the relative importance of heat-related problems.

The emissivity of road marking materials is generally different from the one of the road surface (asphalt or concrete). Being the emissivity an intrinsic property of the material, it changes with the thickness of the road marking film, showing differences in films' thickness and problems of uniformity of application not visible to the naked eye.

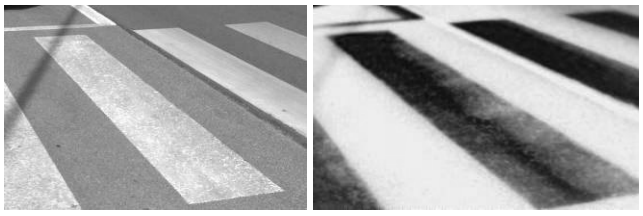


Figure 13: picture of white stripes shot with a normal camera (left) and with an infrared camera (right).

ROAD SURFACE MARKINGS' PERFORMANCE MONITORING

Municipality's territory is crossed by high intensity traffic routes with 1000 vehicles per hour, but also by local streets

with lower traffic density and street surfaces range from smooth pavement to cobblestones. Furthermore several materials are used as road markings (paints, thermoplastics, preformed tapes, etc).

The unit of Perugia of CIRIAF will execute measurements in selected places, representative of the whole municipality of Perugia, in order to extend the results on its entire territory. So the selected locations of measurements have to take into account all the most representative surfaces which can be found throughout the whole territory of Perugia Municipality.

A wide range of horizontal marking materials will be considered, both standard (paint, thermoplastic, two-components, preformed) and innovative, in order to compare their performance.

A total number of 36 sites have been selected, taking into account three main factors:

- traffic flow (high, medium, low);
- street surface (smooth, rough, other like cobblestone);
- road marking materials.

The parameters have been chosen in order to guarantee the upscaling of the procedure in other cities.

The parameters to be evaluated are:

- R_L Retroreflectivity in dry and wet conditions;
- Q_d Reflection in daylight;
- Colour;
- Skid resistance.

The infrared camera will be used in all sites for a preliminary test, in order to put in evidence problems of uniformity.

The experimental campaign will start in Spring; in the meanwhile a preliminary measurements campaign is being carried out, in order to define the measurement procedure to be applied in the 36 planned sites.

PRELIMINARY EXPERIMENTAL CAMPAIGN

Three sites have been chosen for the preliminary experimental campaign. Such locations have in common low traffic flows (to guarantee the operators' safety) and differ by the material used for the marking.

In the first site the analyzed material is a preformed tape laid on a smooth road surface. In order to obtain a more representative information, 8 different measurements in different points of the stripes were carried out (fig. 14).

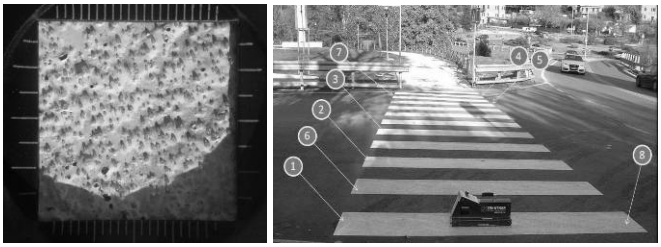


Figure 14: Pictures of white stripes tested

The average values of R_L in dry conditions, R_L in wet conditions and Q_d are respectively 598, 55 and 198 mcd/(lux·m^2), higher than the prescription of UNI 1436. Moreover SRT is 42, lower than the minimum value required by the standard (45). These results were expected because of the large amount of glass beads included in the tape (see fig. 14).

A thermoplastic signal has been tested in the second site, characterized by a smooth road surface. Ten measurements were carried out.

The average values of R_L in dry conditions, R_L in wet conditions, Q_d are respectively 132, 36 and 136 mcd/(lux·m^2); SRT is equal to 63. All the parameters show values complying to the requirements of UNI 1436. Nevertheless, in particular for R_L, the values are deeply influenced by the point of measure, ranging from 43 to 238 mcd/(lux·m^2) (see fig. 15). Results clearly evidence the effect of the crossing of tires on the stripes, that dirty the surface and remove a portion of glass beads.

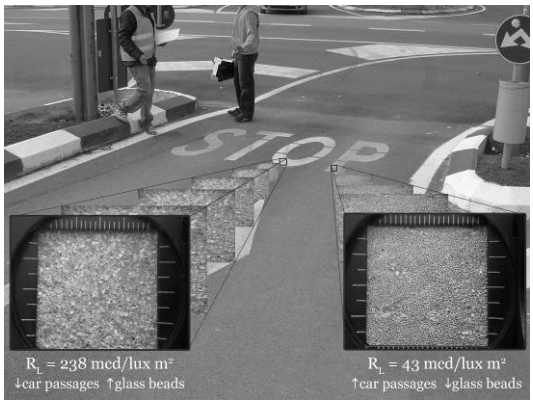


Figure 15: Effect of tires on road markings

The last site is a bus lane with yellow paint recently installed. In this case, while the performance concerning SRT and Q_d are satisfying (respectively 50 and 126 mcd/(lux·m^2)), the retroreflectivity is much lower than the requirements, both in dry (R_L= 27 mcd/(lux·m^2)) and wet (R_L= 18 mcd/(lux·m^2)) conditions. This results from the total absence of glass beads, as shown in figure 16.

Finally, the results concerning the chromatic coordinates of road markings in all the sites comply to those required by the standard.

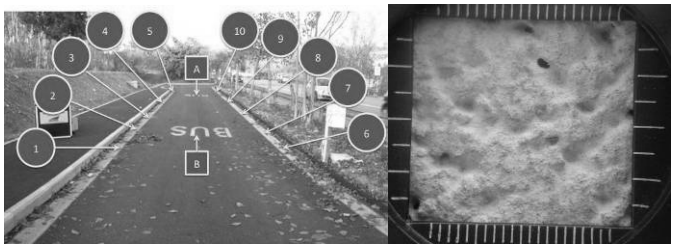


Figure 16: Bus lane with yellow paint

FUTURE DEVELOPMENTS

Waiting for the start of experimental campaign, the CIRIAF team of Perugia is developing an innovative indicator in order to give an efficient tool to rate the quality of the pavement marking of the roads managed by the municipality. This indicator, that will have adimensional values from 0 to 100, will take into account all the parameters characterizing the performance of a road marking:

- luminance Coefficient in day conditions Q_d;
- retroreflectivity in night conditions R_L (dry, wet);

- skid resistance SRT;
- colour;
- type of material for the pavement markings;
- volume of traffic;
- characteristics of pavement;
- ageing.

All the results will be weighted according to the importance of the parameters and averaged for the different condition of measurements, in order to have a realistic picture of the condition of the pavement markings installed on the road managed by the municipality.

The indicators will be evaluated for white and yellow (not considering temporary markings) stripes separately.

The analysis of the results obtained from the experimental campaign and the use of the developed indicator could help to give the outline of the situation of road marking quality and suggests actions to improve the performance.

Finally, a protocol reporting the procedures for in situ evaluation of road pavement marking properties will be developed. This protocol will be a powerful tool to verify the quality of the application of road markings in order to assess if the requirements given in tenders are fulfilled.

The protocol will also be extended to the other cities involved in the project.

REFERENCES

1. EN 1436 – Road marking materials - Road marking performance for road users, 2007.
2. EN 1463 – Retro reflecting Road Studs, 2009.
3. EN 1790 – Preformed Road Markings, 1998.
4. EN 1824 – Road Trials, 1998.
5. EN 1871 – Physical Properties, 2000.
6. EN 1423 – Glass Beads, Aggregates and mixtures, 1997.
7. EN 1424 – Premix glass beads, 1997.
8. Jiang Y., Durability and Retroreflectivity of Pavement Markings, USA and Federal Highway Administration, National Technical Information Service,2008
9. Andrle, S. J., K. K. Knapp, T. McDonald, and D. E. Smith. Iowa Traffic Control Devices and Pavement Markings: A Manual for Cities and Counties. Iowa Highway Research Board Project TR-441. Iowa State University, Center for Transportation Research and Education, Ames, IA, April 2001.
10. Road safety marking association, Road Markings, Road Safety & Efficent road utilization in 21st Century Britain, 2007
11. Cleland B.S., Walton D., Thomas J.A., The relative effects of road markings on cycle stability, Safety Science 43, 75-89, 2005
12. Giuliani F., Rastelli S., Efficienza e durabilità dei preformati termoplastici e dei laminati elastoplastici per la segnaletica orizzontale, XVI Convegno Nazionale S.I.I.V., 2006.
13. Frankinet M. e alt., Caratterizzazione dei manti stradali, Luce, 4/2006.
14. Folcheri G., L'importanza della segnaletica per la sicurezza nella guida, Luce, 3/2004.

ACKNOWLEDGMENTS

The Authors are indebted to Mr. Giuliano Bastianelli (Head of the road marking staff of the Municipality of Perugia) for the precious information on the marking materials and for the selection of the measurement sites and to Mr. Francesco Zappia for the support during the measurement campaign.

CARATTERIZZAZIONE DELL'ILLUMINAZIONE DELLE PRINCIPALI VIE DI CASTIGLIONE DEL LAGO (PG) MEDIANTE SIMULAZIONI

Rita Mariani[1], Margherita Scoccia[1], Nicola Sisti[1]

[1] Università di Perugia, Facoltà di Ingegneria – Dipartimento di Ingegneria Industriale – Sezione di Fisica Tecnica
Via G. Duranti n. 67 – 06125 Perugia

SOMMARIO

L'Umbria solo recentemente si è dotata di una legislazione in materia di prevenzione dall'inquinamento luminoso e risparmio energetico; la Legge Regionale n. 20 è stata infatti approvata nel febbraio 2005 e il relativo Regolamento Attuativo solo nell'aprile del 2007. Di conseguenza, ad oggi, pochi comuni si sono dotati di un piano di illuminazione comunale; tra questi il Comune di Castiglione del Lago, in Provincia di Perugia.

Il Piano, redatto dal CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici) nel periodo gennaio 2008 – gennaio 2009, è attualmente in fase di approvazione da parte dell'Amministrazione Comunale; dalle analisi effettuate sullo stato attuale dell'illuminazione pubblica, è emersa la necessità di verificare i parametri illuminotecnici relativi alle tre principali vie di accesso al centro abitato principale, Via Buozzi, Via Roma e Via Firenze. Ad una prima fase di rilievo geometrico delle tre strade sono seguite la fase di simulazione mediante il codice di calcolo Litestar 10.0 e il confronto dei risultati ottenuti con i parametri illuminotecnici (luminanza media del manto stradale, uniformità longitudinale, incremento di soglia, rapporto di contiguità) di riferimento per la categoria illuminotecnica assegnata alle tre vie in base alle norme UNI EN 13201-2 e UNI 11248. Sono stati infine proposti degli interventi al fine di rendere ottimale il comfort visivo e ne sono stati valutati i costi.

INTRODUZIONE

Con *inquinamento luminoso* [1] si intende ogni forma di irradiazione artificiale che si disperda al di fuori delle aree a cui essa è funzionalmente dedicata o che sia diretta al di sopra della linea di orizzonte; risulta evidente come un uso scarsamente pianificato dell'energia per l'illuminazione artificiale esterna produca uno spreco delle risorse energetiche. Nell'ultimo decennio si è presa coscienza di come l'inquinamento luminoso sia una vera e propria forma di degrado del paesaggio, per questo motivo, a partire dal 1997, diverse Regioni, il Veneto per prima, si sono dotate di una legge in materia. Il 28 febbraio 2005 la Regione Umbria ha approvato la L.R. n° 20 *Norme in materia di prevenzione dall'inquinamento luminoso e risparmio energetico* [1], all'interno della quale il tema dell'inquinamento luminoso è strettamente collegato al risparmio energetico. La Legge della Regione Umbria stabilisce che, tra gli strumenti di pianificazione e di gestione dei propri Comuni, debba essere annoverata anche la stesura di un Piano Comunale per l'Illuminazione Pubblica, il PRIC, che garantisca il rispetto delle finalità espresse dalla Legge stessa. In accordo con le prescrizioni della Legge Regionale e del relativo Regolamento di Attuazione del 5 Aprile 2007 [2], il Comune di Castiglione del Lago (Perugia) ha deciso di dotarsi di un Piano Regolatore di Illuminazione Comunale.

Lo scopo primario è quello di fornire ai soggetti preposti alla pianificazione, progettazione, realizzazione e manutenzione degli impianti d'illuminazione, un quadro finale organico ed univoco di criteri che permettano la prevenzione dell'inquinamento luminoso ed ottenere un conseguente risparmio energetico. Tale pianificazione, nel contempo, non deve inficiare, ma garantire gli standard necessari alla sicurezza del luogo in tema di illuminazione pubblica delle strade, del territorio e del costruito, anzi migliorandone le condizioni, e contribuire alla valorizzazione dell'ambiente urbano e dei centri storici. Dal punto di vista economico, il PRIC costituisce inoltre un utile riferimento per la programmazione degli investimenti e delle spese future. Attraverso la stesura del Piano, il CIRIAF ha così potuto determinare quali siano le modalità di progettazione e di verifica degli impianti di illuminazione, secondo le indicazioni fornite dalla normativa nazionale ed europea. Il Piano ha comportato per la sua stesura un meticoloso lavoro di rilevo ed analisi della struttura impiantistica esistente, per poi proseguire attraverso la comparazione dei dati illuminotecnici attuali con quelli indicati dalla normativa di riferimento. In particolare, tali verifiche sono state effettuate in alcune delle strade principali del centro abitato (Via Buozzi, Via Firenze e Via Roma): i parametri illuminotecnici rilevati sono stati elaborati con l'utilizzo del programma Litestar 10.0, per poi comparali a quelli normati. Questo lavoro ha potuto in tal modo dare esito ad alcune proposte progettuali per uniformare tali parametri a quelli indicati, attraverso anche un'analisi dei relativi investimenti economici necessari.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le normative cui si è fatto riferimento per la verifica dell'illuminazione delle tre vie di Castiglione del Lago sono le UNI EN 13201-2:2004, UNI EN 13201-3:2004, UNI 11248:2007 e UNI 10849:1999 [3, 4, 5, 6].

Le prime due, di stampo europeo, definiscono le categorie illuminotecniche e i fattori ambientali per l'illuminazione stradale, descrivono inoltre le convenzioni e i procedimenti matematici da adottare per il calcolo delle prestazioni fotometriche degli impianti di illuminazione stradale. La UNI

EN 13201-2 delimita, per mezzo di requisiti fotometrici, le classi di impianti di illuminazione stradale in relazione alle esigenze di visione degli utenti, indicando gli aspetti ambientali da considerare nella progettazione e collocazione degli impianti.

La norma definisce delle categorie illuminotecniche caratterizzate da una serie di requisiti fotometrici che tengono conto delle esigenze visive di determinati utenti della strada in certi tipi di zone della stessa: lo scopo di definire categorie illuminotecniche è quello di facilitare lo sviluppo e l'impiego di prodotti e servizi per l'illuminazione stradale nei Paesi membri del CEN. La norma definisce inoltre alcuni criteri da rispettare per quanto riguarda la progettazione e la collocazione degli impianti e delle apparecchiature per l'illuminazione stradale, sia di giorno che di notte; questo vale non soltanto per l'utente della strada ma anche per l'osservatore a distanza.

La UNI EN 13201-3 definisce le convenzioni e gli algoritmi che devono essere adottati per calcolare le prestazioni fotometriche di impianti di illuminazione stradale progettati in conformità alla UNI EN 13201-2.

Le normative italiane UNI 11248 e UNI 10849, inoltre determinano precisamente le condizioni di illuminazione in una data zona della strada, e stabiliscono i requisiti degli impianti di illuminazione esterna per la limitazione della dispersione verso l'alto del flusso luminoso proveniente da sorgenti di luce artificiale.

La norma UNI 11248 indica come classificare una zona esterna destinata al traffico, ai fini della determinazione della categoria illuminotecnica che le compete; fornisce, ancora, la procedura per la selezione delle categorie illuminotecniche che competono alla zona classificata e le prescrizioni sulle griglie di calcolo per gli algoritmi della UNI EN 13201-3; oltre a ciò identifica gli aspetti che condizionano l'illuminazione stradale e, attraverso la valutazione dei rischi, permette il conseguimento del risparmio energetico e la riduzione dell'impatto ambientale.

Essa si applica agli impianti di illuminazione fissi, progettati per offrire all'utilizzatore delle zone pubbliche, adibite alla circolazione, buone condizioni di visibilità durante i periodi di oscurità.

La norma UNI 10849 infine prescrive i requisiti degli impianti di illuminazione esterna, per la limitazione della dispersione verso l'alto di flusso luminoso proveniente da sorgenti di luce artificiale, anche al fine di non ostacolare l'osservazione astronomica: tale norma non considera la limitazione della luminanza notturna del cielo dovuta alla riflessione delle superfici illuminate o a particolari condizioni locali, quali l'inquinamento atmosferico, ma si applica esclusivamente agli impianti di illuminazione esterna di nuova realizzazione.

In base alle norme UNI 11248 ed UNI 13201-2, le vie esaminate, rientranti nella classe E (viabilità extraurbana secondaria che, nel momento in cui attraversa il centro abitato, diventa strada di quartiere) sono caratterizzate da velocità di marcia basse (non superiori a 50 km/h): tali strade rientrano nella categoria ME3c, che indica un valore di luminanza del manto stradale della carreggiata in condizioni di manto stradale asciutto pari a 1,00 cd/m^2; infine, secondo la UNI 10849, le strade analizzate sono classificabili in zone di tipo A3, ovvero dove la sicurezza è a carattere prioritario, ma lontano da aree di particolare tutela nei confronti degli osservatori astronomici.

LE SIMULAZIONI EFFETTUATE

Il programma di calcolo LITESTAR 10.0 [7], impiegato nelle simulazioni, è in grado di analizzare le prestazioni illuminotecniche degli impianti stradali in base alla norma UNI EN 13201-3. Al fine di effettuare le simulazioni è stata preparata una *Scheda di rilievo* utilizzata per annotare, in loco, tutti i dati di input necessari al lavoro, dividendoli in *Informazioni generali* e *Dati geometrici*, quali la larghezza del marciapiede, della strada, la distanza tra gli apparecchi, la loro altezza. Nell'ultima parte della scheda è stato inserito il nome dell'azienda produttrice dell'apparecchio illuminante, il tipo e il numero di elementi presenti nell'intero tratto.

Dall'analisi delle tre strade durante i rilievi, è emersa la necessità di suddividerle in diversi tratti, considerando quelli più rappresentativi ai fini del lavoro e cercando di considerare zone con caratteristiche simili dal punto di vista illuminotecnico. In particolare l'illuminazione di via Firenze e di via Buozzi è stata simulata in quattro tratti, quella di via Roma in tre.

Gli apparecchi esistenti sono prodotti dell'azienda Faeber, nello specifico tipo K1 [8], modello le cui caratteristiche principali sono:

- vetro di forma prismoide;
- classe di isolamento I;
- inclinazione rispetto all'orizzontale di 15°;
- attacco per la lampada di tipo E27;
- attacco per il montaggio del palo Φ 60-70;
- lunghezza di 625 mm e larghezza di 310 mm.

Si riporta in fig. 1 una foto dell'apparecchio e la relativa fotometria.

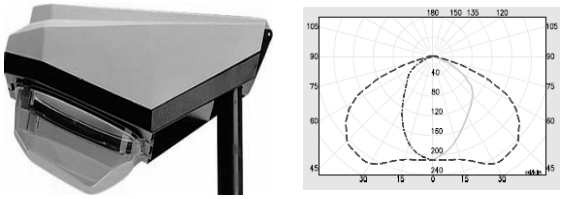


Figura 1: Apparecchio stradale Faeber K1 e curva fotometrica

Per quanto riguarda le lampade, nelle simulazioni sono state considerate due situazioni, per tenere conto di un intervento di ammodernamento dell'impianto recentemente attuato dall'Amministrazione Comunale:

1. lampade al mercurio da 125 W, caratterizzate da un flusso luminoso di 6300 lm;
2. lampade al sodio al alta pressione tubolari da 70 W, caratterizzate da un flusso luminoso di 6600 lm.

Sicuramente mediante l'intervento si è ottenuto un risparmio energetico dovuto alla minore potenza installata ed anche un beneficio legato all'aumento del flusso luminoso emesso, che le simulazioni hanno permesso di valutare.

RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

La tab. 1 mostra i risultati delle simulazioni in ogni tratto di strada esaminato, sia prima che dopo l'intervento di sostituzione delle lampade, e i valori di riferimento secondo la UNI 13201-2 per la categoria illuminotecnica ME3c assegnata alle tre strade. Nella riga corrispondente alla situazione attuale sono evidenziati i valori che non rispettano la normativa.

Tabella 1: Risultati delle simulazioni

		PARAMETRI				
		L_{med} [cd/m^2]	U_l [-]	U_0 [-]	Ti [%]	Sr [-]
VALORI DI RIFERIMENTO UNI 13201-2 CAT. ME3c		≥ 1,00	≥ 0,50	≥ 0,40	≤ 15	≥ 0,50
Via Buozzi Tratto 1	Ante-operam	0,47	0,59	0,23	12,07	0,79
	Post-operam	**0,51**	0,59	**0,23**	12,20	0,79
Via Buozzi Tratto 2	Ante-operam	0,37	0,58	0,19	13,13	0,39
	Post-operam	**0,39**	0,58	**0,19**	13,25	**0,39**
Via Buozzi Tratto 3	Ante-operam	0,29	0,57	0,19	14,98	0,31
	Post-operam	**0,30**	0,57	**0,19**	**15,12**	**0,31**
Via Buozzi Tratto 4	Ante-operam	0,55	0,61	0,25	11,81	0,78
	Post-operam	**0,57**	0,61	**0,25**	11,92	0,78
Via Firenze Tratto 1	Ante-operam	0,32	0,57	0,19	14,85	1,11
	Post-operam	**0,33**	0,57	**0,19**	14,99	1,11
Via Firenze Tratto 2	Ante-operam	0,44	0,50	0,18	12,55	0,80
	Post-operam	**0,46**	0,50	**0,18**	12,67	0,80
Via Firenze Tratto 3	Ante-operam	0,39	0,42	0,18	13,44	0,80
	Post-operam	**0,42**	**0,42**	**0,18**	13,56	0,80
Via Firenze Tratto 4	Ante-operam	0,22	0,66	0,19	11,22	0,82
	Post-operam	**0,46**	0,66	**0,19**	13,05	0,82
Via Roma Tratto 1	Ante-operam	0,42	0,41	0,20	13,43	0,27
	Post-operam	**0,44**	**0,41**	**0,20**	13,56	**0,27**
Via Roma Tratto 2	Ante-operam	0,53	0,37	0,24	10,64	0,29
	Post-operam	**0,55**	**0,37**	**0,24**	10,74	**0,29**
Via Roma Tratto 3	Ante-operam	0,42	0,28	0,20	13,94	0,64
	Post-operam	**0,44**	**0,28**	**0,20**	14,07	0,64

I valori di luminanza media sul manto stradale e di uniformità generale non sono mai rispettati, sia nel caso di lampade al mercurio, sia di lampade SAP; in media i valori di riferimento per L_{med} si attestano su 0.3-0.5 cd/m^2. Il passaggio da lampade al mercurio a lampade SAP ha prodotto mediamente un miglioramento di 0.02 cd/m^2; il miglioramento massimo si è avuto nel tratto 4 di via Firenze ed è stato pari a 0.24 cd/m^2. Tenendo conto che la norma 13201-2 stabilisce come minimo per la luminanza 1 cd/m^2, si può dedurre che l'illuminazione sul manto stradale nelle tre vie non è sufficiente e, come prevedibile, l'intervento di sostituzione delle lampade non ha portato a risultati di rilievo in quanto si è aumentato di poco il flusso luminoso dal caso ante-operam al caso post-operam, da 6300 lm a 6600 lm.

L'uniformità generale U_0 è sempre al di sotto del minimo stabilito, 0.40; i valori variano in un range piccolo e non superano mai lo 0.25 del quarto tratto di via Buozzi; inoltre non c'è alcuna variazione dopo il montaggio delle lampade SAP.

Per quanto riguarda l'uniformità longitudinale U_1 si può notare che, in via Firenze, tranne che nel terzo tratto, e in via Buozzi, i requisiti normativi vengono rispettati; questo non accade, invece, in via Roma in cui si è un po' al di sotto dello 0.50 stabilito dalla UNI EN 13201-2. Anche per questo parametro non si sono avuti miglioramenti sostituendo le lampade.

L'abbagliamento debilitante TI rispetta invece il valore massimo del 15% e la variazione tra le due simulazioni è minima.

Il rapporto di contiguità Sr rispetta la norma e quindi supera il valore di 0.50, in quasi tutti i tratti, fatta eccezione per i primi due di via Roma e per il secondo ed il terzo di via Buozzi.

Le simulazioni hanno inoltre fornito un valore dell'inquinamento luminoso pari a 1.84%, valore che nel caso del Comune di Castiglione del Lago è accettabile in quanto non si hanno postazioni astronomiche vicine con le quali il flusso luminoso può interferire.

In conclusione, la sostituzione delle lampade non ha portato ad un aumento rilevante dei valori dei parametri illuminotecnici; è stato ottenuto un aumento minimo della luminanza media del manto stradale e dell'abbagliamento debilitante; la convenienza ed il miglioramento sono da ricercare nel risparmio energetico, tenendo conto della diminuzione della potenza totale installata.

Si riporta inoltre, a titolo di esempio, il diagramma spot della luminanza (fig. 2 e 3), relativo all'osservatore e alla corsia di riferimento per il confronto con la normativa, del tratto più sfavorito (Via Buozzi, tratto 3) e di quello che presenta i parametri illuminotecnici migliori (Via Buozzi, tratto 4).

Si può notare come la stessa via presenti caratteristiche illuminotecniche disomogenee e nella stessa corsia si passi da valori ben al di sotto di 1 cd/m^2 (0.22 cd/m^2 del tratto 3) a valori superiori (1.46 cd/m^2 del tratto 4).

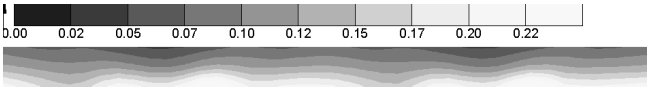


Figura 2: Via Buozzi, tratto 3, corsia 2, osservatore 1

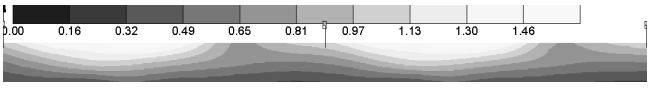


Figura 3: Via Buozzi, tratto 4, corsia 2, osservatore 2

IPOTESI DI INTERVENTO E SIMULAZIONI DI PROGETTO

I risultati delle simulazioni mostrano che l'illuminazione attuale delle tre vie in esame non soddisfa i requisiti illuminotecnici richiesti dalla normativa UNI EN 13201-2 per la categoria illuminotecnica assegnata, Me3c. Si è cercato, quindi, di soddisfare le richieste della normativa sostituendo gli apparecchi stradali attualmente installati con altri di ultima

generazione, aventi altre caratteristiche fotometriche; per quanto riguarda le lampade si è scelto di utilizzare quelle presenti.

Dopo aver effettuato prove con diverse tipologie di apparecchi, si è scelto di presentare i migliori risultati ottenuti; si riportano di seguito le principali caratteristiche dell'apparecchio che li ha forniti.

L'apparecchio stradale *cut-off* scelto è il tipo *Avenue*, prodotto dalla Gewiss [9], le cui caratteristiche principali sono:

- vetro di forma piana;
- classe di isolamento II;
- inclinazione rispetto all'orizzontale da 0° a 15°;
- grado di protezione IP 65 sia per il vano ottico che per il vano elettrico;
- attacco per la lampada di tipo E27;
- attacco per il montaggio del palo da 42 a 76 mm;
- resistenza in tutte le condizioni atmosferiche;
- lunghezza di 770 mm e larghezza di 370 per un'altezza di 285 mm.

È stata scelta la versione bi-regime 50-70 W che consente una riduzione considerevole dei consumi energetici, pur rispettando i valori di illuminamento previsti dalle normative.

Gli speciali dispositivi elettronici programmabili rendono possibile la commutazione della potenza da piena a ridotta, riducendo il flusso luminoso durante le tarde ore notturne, quando il traffico veicolare è limitato. Il sistema non necessita di orologi esterni, sensori crepuscolari o di fasi di comando aggiuntive da portare al punto luce. Inoltre, in modo automatico, il dispositivo elettronico segue le variazioni stagionali dei cicli di luce e buio, garantendo un risparmio energetico ed economico pari almeno al 30% durante gli orari di funzionamento a potenza ridotta. L'esperienza di questi nuovi impianti dimostra che l'investimento iniziale, maggiore rispetto alle versioni tradizionali, viene recuperato mediamente nell'arco di 3 - 4 anni.

Per quanto riguarda i dati geometrici è stato scelto un palo di altezza 9,0 m, rispetto ai 7,0 m del palo montato attualmente, per avere una maggiore uniformità lungo tutta la carreggiata; oltre a ciò è stato aggiunto uno sbraccio di 1 m nelle simulazioni di via Firenze e di via Buozzi, affinché il flusso luminoso arrivasse anche nell'altra corsia della carreggiata, così da migliorare i valori dei parametri illuminotecnici richiesti dalla normativa. Al fine di ottenere risultati più vicini ai requisiti limite di norma, in via Roma l'apparecchio è stato simulato senza lo sbraccio.

La fig. 4 mostra una foto dell'apparecchio e la corrispondente curva fotometrica; la tabella 2 il confronto tra le simulazioni dello stato attuale e dell'ipotesi di intervento.

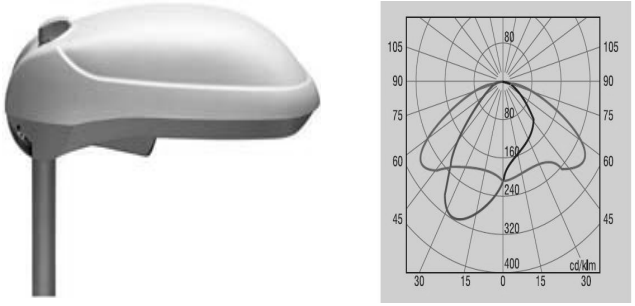


Figura 4: Apparecchio Avenue, prodotto dalla Gewiss e curva fotometrica

Tabella 2: Confronto tra le simulazioni dello stato attuale e dell'ipotesi di intervento

VALORI DI RIFERIMENTO UNI 13201-2 CAT. ME3c		PARAMETRI				
		L_{med} [cd/m^2]	U_l [-]	U_0 [-]	Ti [%]	Sr [-]
		≥ 1,0	≥ 0,5	≥ 0,4	≤ 15	≥ 0,5
Via Buozzi Tratto 1	Situazione attuale	**0,51**	0,59	**0,23**	12,20	0,79
	Ipotesi di intervento	**0,71**	0,63	0,55	6,17	0,50
Via Buozzi Tratto 2	Situazione attuale	**0,39**	0,58	**0,18**	13,25	**0,39**
	Ipotesi di intervento	**0,61**	0,55	0,50	6,31	0,51
Via Buozzi Tratto 3	Situazione attuale	**0,30**	0,57	**0,19**	**15,12**	**0,31**
	Ipotesi di intervento	**0,62**	0,55	0,53	6,16	0,50
Via Buozzi Tratto 4	Situazione attuale	**0,57**	0,62	**0,25**	11,92	0,78
	Ipotesi di intervento	**0,73**	0,65	0,63	5,94	0,50
Via Firenze Tratto 1	Situazione attuale	**0,33**	0,57	**0,19**	14,99	1,11
	Ipotesi di intervento	**0,62**	0,54	0,53	6,10	**0,46**
Via Firenze Tratto 2	Situazione attuale	**0,46**	0,50	**0,18**	12,67	0,80
	Ipotesi di intervento	**0,67**	0,52	0,58	6,44	0,50
Via Firenze Tratto 3	Situazione attuale	**0,42**	**0,41**	**0,18**	13,56	0,80
	Ipotesi di intervento	**0,59**	0,50	0,50	6,37	0,50
Via Firenze Tratto 4	Situazione attuale	**0,46**	0,66	**0,19**	13,05	0,82
	Ipotesi di intervento	**0,62**	0,54	0,54	6,05	0,50
Via Roma Tratto 1	Situazione attuale	**0,44**	**0,41**	**0,20**	13,56	**0,27**
	Ipotesi di intervento	**0,59**	0,50	0,50	6,35	**0,42**
Via Roma Tratto 2	Situazione attuale	**0,55**	**0,37**	**0,24**	10,74	**0,29**
	Ipotesi di intervento	**0,61**	0,50	0,57	6,14	0,50
Via Roma Tratto 3	Situazione attuale	**0,44**	**0,28**	**0,20**	14,07	0,64
	Ipotesi di intervento	**0,54**	0,50	0,51	7,05	**0,43**

Dal confronto tra le due simulazioni, si può notare che, scegliendo un apparecchio di ultima generazione con una fotometria diversa e apportando delle modifiche geometriche, quali l'altezza del palo da 7 m a 9 m e aggiungendo uno sbraccio di 1 m, i valori dei parametri illuminotecnici si avvicinano a quelli richiesti dalla normativa. L'uniformità generale U_0, che prima era ben al di sotto dello 0,4 richiesto, con gli apparecchi della Gewiss lo supera in tutti i tratti considerati; allo stesso modo l'uniformità longitudinale U_l

rispetta la normativa UNI EN 13201-2 anche in via Roma dove prima aveva valori inferiori di 0,5. L'abbagliamento debilitante TI, seppur anche nelle simulazioni effettuate con le lampade SAP, montate negli apparecchi della Faeber rispettava, tranne in un tratto, la normativa, con le modifiche apportate ha valori inferiori, e quindi migliori dal punto di vista del benessere visivo per gli utenti della strada: si è passati da valori superiori al 10% a valori intorno al 6%. Per quanto riguarda il rapporto di contiguità Sr si può costatare un leggero peggioramento che non comporta, però, un problema dal punto di vista del rispetto della normativa, in quanto i valori ottenuti sono in tutti i tratti al limite con i minimi richiesti dalla UNI EN 13201-2.

Un discorso a parte è da farsi per la luminanza del manto stradale L_{med}. Utilizzando gli apparecchi della Gewiss si riscontra un costante e notevole miglioramento rispetto all'impiego degli apparecchi Faeber, fino a raggiungere un aumento del 100% del suo valore nel secondo tratto di via Buozzi, e comunque, in media, si ha un aumento di circa il 50% su tutti i tratti in esame. I valori comunque, non arrivano ancora ad 1 cd/m^2 , che è il valore minimo necessario per il rispetto della normativa. Questo è imputabile al fatto che, per la geometria della strada sarebbe opportuno che i lampioni fossero disposti su due file, in quanto il flusso luminoso non arriva con la stessa intensità dalla parte della carreggiata opposta agli apparecchi stessi.

Si riportano i diagrammi spot della luminanza relativi ai due tratti precedentemente esaminati (fig. 5 e 6).

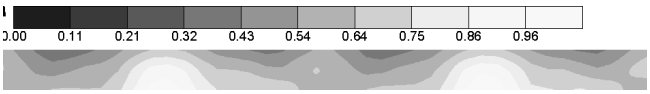


Figura 5: Via Buozzi, tratto 3, corsia 2, osservatore 1

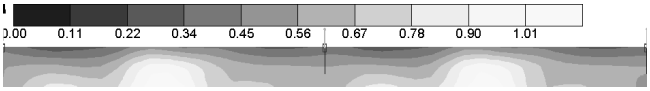


Figura 6: Via Buozzi, tratto 4, corsia 2, osservatore 2

Poiché anche la sostituzione degli apparecchi attualmente installati non fornisce risultati pienamente conformi alla normativa, è stata effettuata un'ulteriore simulazione che considera come dovrebbero essere disposti gli apparecchi lungo la carreggiata affinché i valori di tutti i parametri illuminotecnici rispettino la normativa.

A titolo di esempio è stato preso in esame il tratto 2 di via Roma. La simulazione è stata fatta con gli apparecchi della Faeber, cioè quelli montati attualmente; è stata lasciata inalterata l'altezza del palo di 7 m, l'angolo di inclinazione dell'apparecchio di 15°, l'interdistanza tra i pali nel tratto, che un questo tratto è di 32 m e lo sbraccio, che comprende solo la lunghezza dell'apparecchio stesso che è di 20 cm. È stata cambiata la disposizione degli apparecchi lungo la carreggiata che risultano montati su due file a quinconce; quindi, nel tratto di studio che il software prende in esame, ci sono cinque apparecchi invece che tre. I valori che si ottengono effettuando il calcolo dei parametri illuminotecnici sono riportati in tabella 3.

Disponendo gli apparecchi su due file, il flusso luminoso arriva su entrambe le corsie della strada, così da far salire la luminanza media del manto stradale L_{med} fino al valore di 1,14 e anche gli altri parametri soddisfano i valori richiesti dalla normativa.

Si riportano infine i diagrammi spot della luminanza per la simulazione effettuata (fig. 7 e 8).

Tabella 3: Risultati della simulazione in Via Roma, tratto 2

PARAMETRI	VALORE DI RIFERIMENTO	UNI 13201-2 CAT. ME3c
L_{med} [cd/m^2] minima	1,14	1,00
U_l [-] minima	0,51	0,50
U_0 [-] minima	0,62	0,40
Ti [%] massimo	8,81	15
Sr [-] minima	0,55	0,50
Rn [%]	1,84	-

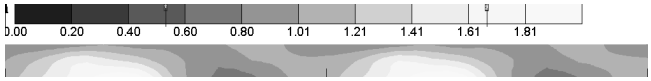


Figura 7 Via Roma , tratto 2, corsia 1, osservatore 2

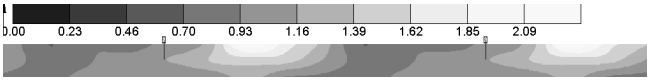


Figura 8: Via Roma , tratto 2, corsia 2, osservatore 2

STIMA DEL COSTO DEGLI INTERVENTI IPOTIZZATI

La prima ipotesi di intervento simulata non comporta la sostituzione delle lampade attualmente installate, per questo motivo non si ha un risparmio energetico rispetto alla situazione attuale. D'altra parte, avendo adottato una versione bi-regime 50-70 W, si ha un risparmio energetico dovuto all'abbassamento del flusso luminoso nelle ore in cui il traffico è minore. Gli apparecchi della Gewiss riducono, inoltre, la percentuale di inquinamento luminoso R_n fino allo 0.05%, rispetto all'1.84% che si aveva con gli apparecchi della Faeber.

Per quanto riguarda la stima del costo totale dell'intervento ipotizzato, si ha che il costo di listino, IVA esclusa, desumibile dal catalogo Gewiss di ciascun apparecchio è pari a € 219,00. Considerando che in totale nelle tre vie si hanno 126 apparecchi, la spesa per l'acquisto sarebbe pari a € 27.594,00, ai quali si dovrebbe aggiungere il costo dei pali di alluminio, che è di circa € 120,00/cad, degli sbracci di via Firenze e di via Buozzi, i quali hanno un prezzo di listino intorno a € 60,00/cad e le spese di manodopera (tab. 4.). In totale il costo per realizzare questo progetto sarebbe di circa € 47.694, IVA esclusa, alle quali si dovranno sommare le spese di manodopera.

Come visto, pur migliorando i parametri illuminotecnici, la prima ipotesi di progetto non soddisfa pienamente i requisiti dettati dalla normativa UNI EN 13201-2. Con la seconda, invece, i valori rispettano la normativa vigente. Per la stima dei costi necessari per effettuare questo tipo di intervento in tutte e tre le vie prese in esame, bisogna tenere conto che devono essere aggiunti dall'altro lato della carreggiata in totale 125 apparecchi, e che si rende necessaria un'altra linea elettrica per il collegamento di tali apparecchi. Il costo di listino, IVA esclusa, ricavabile dal catalogo Faeber, di un singolo apparecchio è di € 171,00 IVA esclusa che,

moltiplicato per i 125 apparecchi necessari, porta ad una spesa di €21.375, ai quali si dovrebbero aggiungere € 15.000 per i pali. In definitiva il costo complessivo per questo intervento, sarebbe di circa €36.375, alle quali andrebbero sommate le spese di manodopera per il montaggio degli apparecchi e per la realizzazione di una nuova linea elettrica dall'altro lato della carreggiata, dei materiali necessari a tale lavoro e il costo delle 125 lampade, che è di € 2.250,00.

Considerando che in questa ipotesi di progetto, rispetto alla prima, vi è in più la spesa per la realizzazione della rete elettrica per l'allaccio degli apparecchi, si può dedurre il costo per l'esecuzione di questo intervento sia, tra i due, quello superiore. D'altra parte, però, bisogna valutare il fatto che nella prima ipotesi di intervento non si avrebbe il rispetto dei valori limite dettati dalla normativa per tutti i parametri illuminotecnici. In conseguenza a ciò, quindi, si potrebbe affermare, che la migliore delle soluzioni simulate in questo lavoro di tesi, si ha variando la disposizione degli apparecchi sulla carreggiata. In questo modo tutti i parametri illuminotecnici rispetterebbero la normativa UNI EN 13201-2, così da avere una visibilità ottimale da parte di tutti gli utenti della strada, che significa anche una maggior sicurezza per gli stessi.

Tabella 4: Riepilogo dei costi degli interventi (escluso manodopera, materiali per nuova linea elettrica, IVA)

IPOTESI DI INTERVENTO 1			
	N°	COSTO UNITARIO (€)	TOTALE (€)
APPARECCHI	126	219,00	27.594,00
SBRACCI	83	60,00	4.980,00
PALI	126	120,00	15.120,00
COSTO TOTALE (€)			**47.694,00**
IPOTESI DI INTERVENTO 2			
	N°	COSTO UNITARIO (€)	TOTALE (€)
APPARECCHI	125	171,00	21.375,00
SBRACCI	/	/	/
PALI	125	120,00	15.000,00
LAMPADE	125	18,00	2.250,00
COSTO TOTALE (€)			**38.625,00**

CONCLUSIONI

A conclusione della stesura del Piano di Illuminazione del Comune di Castiglione del Lago è emersa la necessità di analizzare lo stato attuale dell'illuminazione pubblica delle tre vie principali di accesso al centro abitato, effettuando delle simulazioni con un software dedicato. L'obiettivo di tali simulazioni è quello di individuare i valori dei parametri illuminotecnici, in modo tale da poterli confrontare con le normative vigenti in materia di illuminazione stradale.

Poiché il Comune di Castiglione del Lago ha provveduto alla sostituzione delle lampade degli apparecchi illuminanti, sono state effettuate due diverse simulazioni: la prima ha riguardato lo stato ante-operam, mentre la seconda ha analizzato la situazione post-operam.

Dopo analizzato i risultati prodotti dal LITESTAR 10.0, si è proceduto al confronto di entrambe le simulazioni con la normativa UNI EN 13201-2; avendo osservato che i parametri illuminotecnici non soddisfano i requisiti limite della norma, si è deciso di cercare altre soluzioni progettuali. Sono state, pertanto, proposte due ipotesi di intervento: nella prima è stata prevista la sostituzione degli apparecchi attualmente in opera con altri di ultima generazione (sono stati scelti i dispositivi della Gewiss); nella seconda è stata modificata la disposizione geometrica degli apparecchi già in uso (Faeber K1).

Confrontando i parametri illuminotecnici ottenuti dalle due ipotesi di intervento con la normativa UNI EN 13201-2 si nota che, nella prima serie di simulazioni non sempre i valori limite sono rispettati mentre, modificando la disposizione degli apparecchi sulla carreggiata, si ottengono dei risultati in linea con la normativa.

Per entrambe le situazioni è stata realizzata una stima dei costi di intervento, dalla quale è risultato che, per cambiare disposizione geometrica agli apparecchi, è necessaria una spesa maggiore. Ciò deriva dal fatto che si rende necessaria una nuova linea elettrica, che porti tensione nella corsia dove attualmente non vi sono apparecchi stradali. In virtù di queste considerazioni si evince che la soluzione migliore, tra quelle analizzate, è quella di disporre gli apparecchi su due file a quinconce, così da ottenere il rispetto della normativa e raggiungere una visibilità ottimale da parte degli utenti della strada.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Legge Regionale n. 20 del 28 febbraio 2005, *Norme in materia di prevenzione dall'inquinamento luminoso e risparmio energetico*.
2. Regolamento Attuativo del 5 aprile 2007 della Legge Regionale n. 20 del 28 febbraio 2005.
3. Norma UNI EN 13201- 2:2004, *Illuminazione stradale, requisiti prestazionali*.
4. Norma UNI EN 13201- 3:2004, *Illuminazione stradale, calcolo delle prestazioni*.
5. Norma UNI 11248:2007, *Illuminazione stradale, selezione delle categorie illuminotecniche*.
6. Norma UNI 10819:1999, *Impianti di illuminazione esterna. Requisiti per la dispersione verso l'alto del flusso luminoso*.
7. Manuale d'uso LITESTAR 10.0.
8. Catalogo tecnico e listino prezzi Faeber.
9. Catalogo tecnico e listino prezzi Gewiss.

OTTIMIZZAZIONE DELLA LOGISTICA DISTRIBUTIVA NELLA ZTL A ROMA: RUOLO DEGLI ATTORI E PROCESSO DECISIONALE

Eva Valeri[1], Amanda Stathopoulos[2], Edoardo Marcucci[3],
Valerio Gatta[4], Lucia Rotaris[5]

[1]Università di Trieste, DISES, Piazzale Europa 1, 34127 Trieste, eva.valeri@units.it
[2]Università di Trieste, DISES, Piazzale Europa 1, 34127 Trieste,
amandairini.blombergstathopoulos@phd.units.it
[3]Università Roma Tre, DIPES/CREI, via G. Chiabrera 199, 00145 Roma,
emarcucci@uniroma3.it,
[4]Università "La Sapienza", DCNAPS, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma,
valerio.gatta@uniroma1.it
[5]Università di Trieste, DISES, Piazzale Europa 1, 34127 Trieste, lucia.rotaris@econ.units.it

SOMMARIO

Gli operatori che effettuano il trasporto merci contribuiscono in modo determinante a garantire la vitalità socio-economica delle aree urbane generando, al contempo, significative esternalità. Molto meno chiaro rimane il ruolo degli altri soggetti che fanno parte della catena di distribuzione merci. Per questa ragione lo studio empirico delle relazioni e interazioni fra agenti è un campo di studio chiave per capire le prestazioni dell'intero sistema di distribuzione urbana.

Il paper individua e indaga la percezione dei problemi, della regolamentazione attuale e delle politiche di trasporto urbano relative alla distribuzione delle merci nella Zona a Traffico Limitato di Roma. Partendo da una serie di consultazioni e *focus group* condotti con gli stakeholders emerge, tra i differenti soggetti intervistati, una significativa disparità nel descrivere i problemi attuali e nel proporre politiche volte a migliorare la situazione attuale. Lo studio empirico degli agenti è fondamentale per valutare la fattibilità e l'efficienza delle politiche di intervento, specialmente in quei casi in cui l'esito finale dipende dalle esigenze di molteplici attori, dal loro ruolo detenuto nella catena di distribuzione, oltre che dalla loro capacità di influenzare le azioni altrui. La concertazione attiva tra gli stakeholders è fondamentale per definire politiche più coerenti e realistiche..

INTRODUZIONE

La city logistics individua soluzioni atte a regolare l'accesso, la circolazione e la sosta dei veicoli commerciali nei centri urbani, senza attuare politiche di restrizione nocive alla prosperità economica e sociale degli stessi e foriere di delocalizzazione delle attività economiche e della popolazione [7]. Si occupa dei problemi tipici connessi al trasporto di merci in ambito urbano, come la congestione, le piazzole di carico e scarico delle merci e le emissioni ambientali causati dai veicoli adibiti al trasporto merci [9]. Al fine di introdurre politiche di successo che ottimizzino il trasporto merci nelle aree urbane (TUM) è importante conoscere adeguatamente sia le necessità sia i problemi dei differenti stakeholders. Come emerge chiaramente dalla letteratura, la movimentazione delle merci nel contesto urbano è caratterizzato da un elevato grado di complessità a causa della grande diversità delle tipologie di merci trasportate, dal decentramento delle decisioni nonché dai numerosi stakeholders. I principali attori di una filiera che produce e distribuisce prodotti in un ambiente urbano sono: i produttori, i ricevitori (rivenditori, clienti), i grossisti, i vettori (operatori dei trasporti), le unità di immagazzinamento, i residenti, i lavoratori e l'Amministrazione Comunale della città [4]. Ogni catena logistica ha specifiche peculiarità che dipendono dalla destinazione del bene finale, dalla tipologia di materie prime utilizzate, dalle caratteristiche della catena di approvvigionamento (produttore, centro di distribuzione, ecc) nonché dal livello di frammentazione delle operazioni che compongono la catena di distribuzione [10].

Nel presente lavoro abbiamo analizzato i problemi legati al TUM nella Zona a Traffico Limitato (ZTL) di Roma. Riportando i risultati di un'indagine empirica effettuata sul campo e che ha coinvolto i principali stakeholders, daremo una risposta alle seguenti domande:

Quali problemi influenzano principalmente il trasporto merci in ambito urbano?

L'attuale regolamentazione del TUM è appropriata?

Quali sono le proposte di politiche di intervento emerse dagli incontri con i diversi attori e quali sono quelle in cui si ha accordo e/o disaccordo?

L'indagine è costituita da una serie di *focus group* tra i differenti stakeholders tra giugno e luglio 2009. I soggetti coinvolti sono stati complessivamente 14 tra operatori di attività economiche e commerciali, associazione ambientalistica, policy makers e trasportatori che operano nella ZTL di Roma.

Il lavoro è organizzato come segue. Il prossimo capitolo riportata una sintetica panoramica sul trasporto delle merci in ambito urbano mettendo in evidenza i principali stakeholders nonché i relativi obiettivi associati. Nel capitolo 2 propone una breve descrizione del trasporto delle merci a Roma nonché dell'attuale regolamentazione della ZTL. La descrizione degli incontri effettuati con gli stakeholders nonché i principali risultati sono proposti nel capitolo 3. Infine, conclusioni, ringraziamenti e riferimenti bibliografici.

IL TRASPORTO URBANO DELLE MERCI: ATTORI E OBIETTIVI

Negli ultimi anni alcune tendenze logistiche ed economico-commerciali hanno determinato una crescente intensità degli approvvigionamenti effettuati da attività localizzate in ambito

urbano. In particolare, le principali tendenze sono da ricondurre alla produzione just in time e quindi alla domanda di prodotti più diversificati e alla diminuzione delle scorte, alla diversificazione dei prodotti nonché all'aumento del costo del terreno nelle aree urbane. Ne consegue, quindi, la modifica nel tempo degli obiettivi dei differenti stakeholders coinvolti nella distribuzione delle merci in ambito urbano. Ognuno di essi persegue, infatti, obiettivi che presentano particolari caratteristiche. La Tabella 1 riporta un sintetico schema dei principali attori. Emerge che ogni singolo operatore ha obiettivi spesso anche contrastanti gli uni con gli altri. I numerosi fallimenti nonché i successi di sperimentazioni di *city logistics* in Europa sono la testimonianza della rilevanza della piena conoscenza dei specifici problemi legati al TUM nonché alla concertazione di essi.

Tabella 1. Principali attori e obiettivi del TUM

ATTORE	OBIETTIVI
Commercianti, GDO, artigiani, attività produttive:	o Consegne rapide e orari prestabiliti o Costo delle consegne accettabile o Frequenza delle consegne sostenuta o Frequenza delle consegne compatibile con la fattibilità
Consumatori/residenti:	o Facilità di acquisto o Accessibilità degli esercizi commerciali
Operatori conto proprio:	o Libertà di auto-approvvigionamento o Libertà di esercitare la "tentata vendita" o Libertà di offerta di servizi artigiani nei centri urbani
Operatori conto terzi:	o Assicurare l'efficienza ed efficacia del servizio, limitando al massimo le restrizioni o Governare il processo di restrizione al traffico dei veicoli più inquinanti o Riconoscere lo sforzo organizzativo compiuto per mantenere alti loading factor
Operatori logistici, terminal, immobiliari:	o Coinvolgimento nella programmazione della *city logistics* o Offerta di aree (interne ed esterne al centro urbano) o Offerta di servizi logistici consolidati

Fonte: Vaghi 2008, nostre elaborazioni

Dati i differenti obiettivi, quindi, è auspicabile la possibilità di "modellare" i propri obiettivi per permettere l'adozione di politiche di city logistics orientate al raggiungimento di obiettivi di carattere ambientale ed economico generale. Inoltre, è evidente che il ruolo principale in questo processo deve essere svolto dalla Pubblica Amministrazione, attore principale nel definire e attuare le politiche di ottimizzazione e razionalizzazione del TUM. In particolare, oltre al citato obiettivo di tutelare la sostenibilità dell'ambiente urbano deve garantire alti livelli di competitività della struttura economica e commerciale cittadina (Vaghi, 2008).

IL TRASPORTO URBANO DELLE MERCI A ROMA

L'indagine effettuata da STA nel 1999 ha rilevato che il centro storico di Roma è interessato dal passaggio giornaliero di 25.000 veicoli merci, tra cui circa 10.000 (40%) sono solo il traffico di attraversamento. Il restante 60% realizzava un totale di 35.000 casi di carico e scarico delle merci. Inoltre, 2/3 delle operazioni hanno avuto luogo in mattinata, tra le 7.00 e le 13.00. Con riferimento alle piazzole di carico e scarico delle merci vi era un uso scarso di tali stalli da parte degli operatori di trasporto. Infatti, il 57% dei trasportatori le utilizzava illegalmente parcheggiando in doppia fila e il 36% parcheggiava ai margini della strada lontano dalle piazzole. Relativamente all'impatto ambientale, l'86% dei veicoli adibiti al trasporto merci nella ZTL merci di Roma erano veicoli alimentati a diesel. Inoltre, la quota di operatori di trasporto in conto proprio nel 1999 era pari a circa 54%, in linea con la media nazionale per questa tipologia di operatore pari a 59% [2]. Con riferimento alla percentuale di conto proprio presente a Roma, uno studio recente evidenzia che tale percentuale è passata dal 54% nel 1999 a 21% nel 2008 [6]. Questo cambiamento è dovuto probabilmente dalla regolamentazione che penalizza gli operatori in conto proprio generando, inoltre, una progressiva riduzione, nello stesso periodo, delle dimensioni medie dei veicoli di questo operatore.

La regolamentazione della ZTL a Roma

Il centro storico della città di Roma è soggetto a una ZTL dalla fine degli anni Ottanta. L'istituzione di un formale ZTL può essere fatta risalire al 1989, quando una zona di 5 km² è stata limitata ai veicoli non residenti. Il divieto di circolazione si applica sia per passeggeri sia ai veicoli che trasportano merci. L'accesso e la circolazione nella zona chiamata "ZTL Anello Ferroviario" è vietato per la pre-Euro 1 e Euro-1 e per i veicoli pesanti, invece la zona centrale che è il focus di questo studio ha una regolamentazione più particolareggiata. Tale area corrisponde ad una zona del centro storico di 4 km². L'ingresso alla ZTL è riservato ai veicoli meno inquinanti (Euro 1 e versioni successive) previo ottenimento di un apposito permesso per l'accesso (ad eccezione dei residenti) [1]. Durante il giorno l'accesso è consentito dalle ore 10,00 alle ore 14,00 e dalle ore 16,00 alle ore 20,00. La tassa per il permesso annuale che consente l'accesso alla ZTL merci è di circa 565 □ I varchi, inizialmente controllati manualmente dalla Polizia Municipale, sono stati dotati di telecamere. L'accesso e il parcheggio dei veicoli adibiti al trasporto merci nella ZTL è soggetto a specifiche finestre di tempo. Tuttavia, una serie di operatori sono comunque esonerati dal pagamento nonché dalle finestre orarie (vedi Tabella 2). La regolazione, infatti, appare volta essenzialmente da un lato, a disincentivare l'attività di trasporto in conto proprio e dall'altro, a creare incentivi per gli operatori di trasporto in conto terzi, scoraggiando così parcheggi illegali dei veicoli merci. Attualmente le finestre di tempo non sono sistematicamente applicate. A causa delle numerose eccezioni alla regolazione, le *time windows* non possono essere considerate né come una politica di riduzione della congestione del traffico né come un ambiente *limited emission*

zone, in quanto le norme sulle emissioni dei veicoli attualmente non fanno parte della regolamentazione. Tuttavia, l'esclusione di veicoli Euro-1 (e precedenti) nonché la riduzione delle tasse per i carburanti alternativi implicano che gli obiettivi ambientali prevalgono su obiettivi di efficienza. Un riassunto sintetico del regime di regolamentazione è riportata nella Tabella 2.

Tabella 2. Regolamentazione attuale della ZTL merci a Roma

Disciplina vigente:
Peso a pieno carico inferiore a 35 q (veicoli N1)
transito e sosta consentiti (nella ZTL controllata dai varchi solo se muniti di contrassegno): I fascia: dalle 20,00 alle 10,00; II fascia: dalle 14,00 alle 16,00
Peso a pieno carico superiore a 35 q (veicoli N2 e N3)
transito e sosta consentiti dalle 20,00 alle 7,00
Deroghe **(transito e sosta sempre consentiti):**
Peso a pieno carico inferiore a 35 q (veicoli N1)
trasporto di generi alimentari deperibili, di medicinali, distribuzione stampa, trasporto preziosi;
autocarri in uso ad agenzie di recapito e ditte di trasporto in conto terzi per facilitare la distribuzione comune delle merci (se iscritti Albo dei Trasportatori);
autocarri per i quali, in relazione a particolarissime condizioni lavorative sia oggettivamente dimostrata l'impossibilità di distribuire le merci nella ZTL nelle fasce orarie consentite;
Peso a pieno carico superiore a 35 q (veicoli N2 e N3)
autocarri che necessitano di transitare al di fuori della fascia oraria consentita se presentano una richiesta motivata; il percorso sarà assegnato in base al tipo di automezzo e alle strade interessate
Senza limiti di peso
trasporto di valori con mezzi blindati e di generi alimentari con furgoni frigorifero

Fonte: Filippi, Campagna, 2008

Nella ZTL merci la regolamentazione per i veicoli adibiti al trasporto merci si somma con quella relativa al rilascio dei permessi a pagamento. È possibile per i veicoli adibiti a carico e scarico delle merci avere un permesso annuale o temporaneo. Sul permesso annuale si applicano degli sconti in base alle prestazioni ambientali del veicolo nella misura del 50% se il veicolo è elettrico, del 25% se il veicolo è a metano, GPL o ibrido.

STAKEHOLDER MEETINGS

L'obiettivo principale di questi incontri è stato quello di individuare e definire l'efficacia e l'efficienza di possibili politiche di intervento potenzialmente implementabili dalle Autorità locali di Roma.

Attori coinvolti

A seguito di un'accurata selezione, i partecipanti agli stakeholder meetings sono stati individuati nelle categorie riportate nella Tabella 3.

I partecipanti sono stati intervistati utilizzando la tecnica dei *focus group*. Questi incontri si sono rilevati preziosi strumenti per capire ed esplorare come gli operatori della *supply chain* potenzialmente potrebbe reagire a nuove politiche di intervento (o mix di politiche) e quale effetto potrebbero generare sul TUM.

Tabella 3. Attori coinvolti negli stakeholder meetings

Categoria di attori	**Tipologia di attori**	**N. attori**
DOMANDA	Rappresentanti di Associazioni di operatori economici e commerciali, Associazione ambientalistica	2
OFFERTA	Associazioni di Trasportatori, operatori di trasporto, Associazione di Industriali	6
POLICY MAKER	Amministrazione Comunale, Azienda di trasporto pubblico locale	6
	TOTALE:	**14**

Steps dei focus groups

Gli incontri sono stati realizzati in due fasi:

I) nella prima fase, ogni singola categoria di operatori è stata intervistata separatamente per cercare di evitare inibizioni dovute dalla presenza di tutte le componenti della supply chain. Sono stati effettuati, quindi, tre incontri separati perseguendo i seguenti obiettivi:

- Identificazione dei problemi rilevanti afferenti al trasporto merci nella ZTL;
- Valutazione dell'adeguatezza dell'attuale regolamentazione del TUM;
- Indicazione delle politiche di intervento più adatte per eliminare i problemi rilevati.

In particolare, è stato chiesto ai partecipanti di compilare un questionario contenente proposte di politiche di intervento(organizzate in macrocategorie come proposto dal DFT – [5]), dal quale è emersa l'importanza assegnata da ciascun attore, mediante l'assegnazione di un punteggio da 0 a 100 (tra le politiche appartenenti a ciascuna macro categoria), alle politiche di intervento preferite.

II) nella seconda fase, le tre categorie di attori sono state intervistate congiuntamente per stimolare un'ampia e trasversale discussione tra tutte le tipologie di attori coinvolti nonché per confermare quanto rilevato nei precedenti incontri. Gli obiettivi dell'incontro congiunto sono stati:

- Condivisione dei risultati dei precedenti incontri sui problemi afferenti al TUM e sull'adeguatezza dell'attuale regolamentazione del TUM;
- Condivisione dei risultati delle politiche di trasporto scelte dai partecipanti.

Anche in questo caso è stato chiesto ai partecipanti di compilare un questionario sulle principali politiche identificate nella fase precedente. Tali informazioni risulteranno indispensabili per implementazione futura di un'indagine stated preference volta ad identificare le determinanti che influenzano il comportamento degli operatori (attività economiche e commerciali, trasportatori e

istituzioni) nel valutare ex-ante l'accettabilità di possibili mix di politiche di intervento.

Problemi afferenti al TUM rilevati durante i *focus groups*

Individuare come i soggetti percepiscono l'esistenza dei problemi che affliggono il TUM è un aspetto difficile e delicato da realizzare. Grazie agli incontri sopra esplicati è stato possibile ricondurre i problemi emersi in due macrocategorie. La prima comprende problemi di carattere generale e identificati principalmente in:

- mancanza di dati disponibili e aggiornati sui flussi di merci e veicoli nelle arre urbane;
- scarsa corrispondenza e integrazione tra i piani di breve e lungo termine afferenti il TUM.

La seconda macrocategoria racchiude problemi cosiddetti specifici riconducibili principalmente alle/alla:

- Piazzole di carico/scarico della merce: scarse, occupate illegalmente, senza videosorveglianza, inadeguate dal punto di vista architettonico;
- Time windows: eccessive deroghe alla regolamentazione attuale del TUM;
- Tassa annuale per entrare nella ZTL merci (per i trasportatori): eccessivamente onerosa.

Quanto menzionato sino ad ora riguarda la percezione complessiva dei problemi afferenti il TUM nella ZTL di Roma da tutte le categorie di stakeholders intervistate. È interessante, quindi, esaminare anche una visione *agent-specific* di questi problemi. Nella Tabella 4 vengono presentati i principali problemi specificandoli per singola categoria di attore.

Tabella 4. Rilevanza dei problemi che affliggono il TUM per tipo di agente

POLICY MAKER	DOMANDA	OFFERTA
1. Inefficienza del sistema di distribuzione (mancanza controllo del load factors e Degli ingressi)	1. Fluidità del traffico (congestione)	1. Piazzole di carico/scarico della merce (mancanza di sorveglianza)
2. Piazzole di carico/scarico della merce (occupate illegalmente)	2. Piazzole di carico/scarico della merce (occupate illegalmente)	2. *Time Windows* (non equa distribuzione delle autorizzazioni)
3. Time Windows (eccessive deroghe)	3. Centro di Distribuzione Urbana e Pick up points (posizionamento e ripartizione dei costi)	3. Tassa annuale di accesso alla ZTL merci (eccessivamente onerosa)

Politiche di intervento più rilevanti per gli stakeholders

Come descritto in precedenza, è stato chiesto ad ogni partecipante di indicare le politiche più rilevanti, assegnando 100 punti tra le politiche appartenenti a ciascuna macro categoria. Il risultato complessivo di questo esercizio è mostrato in Figura 1.

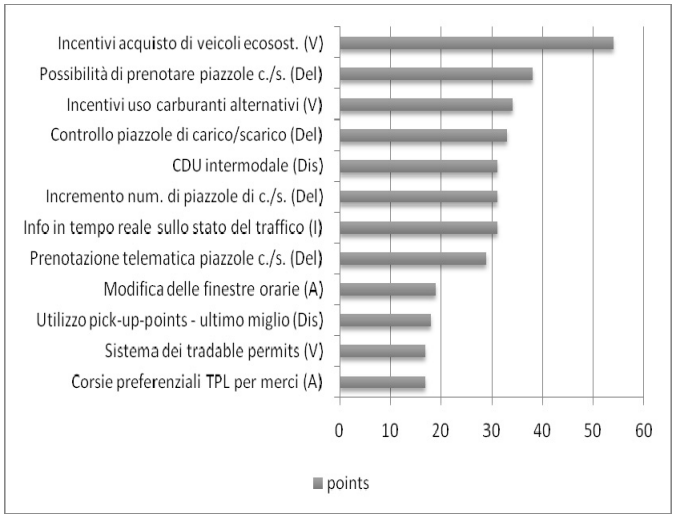


Figura 1. "Top 12" delle politiche più rilevanti (valutazione aggregata)

Non sorprende che, tra le politiche più votate troviamo quelle che sostengono gli incentivi per l'acquisto di veicoli ecologici. Politiche di controllo delle piazzole di carico e scarico delle merci e gli incentivi monetari hanno raccolto da un terzo a quasi la metà dei 100 punti disponibili nella loro categoria macro. Nella parte inferiore della Figura 1 troviamo tutte quelle politiche che implicano un consistente cambiamento del comportamento degli stakeholders (variazioni nel tempo della regolamentazione delle *time windows* e l'installazione di un centro urbano di distribuzione). Infine, un elemento interessanti è l'inclusione di misure di intervento innovative come l'utilizzo per gli operatori di trasporto merci delle corsie preferenziali del trasporto pubblico locale e il sistema dei *tradable permit*.

In realtà da questa analisi aggregata non emergono le possibili differenze e conflitti latenti esistenti tra le differenti tipologie di attori coinvolti.

Nelle Figure 2, 3 e 4 sono state riportate le "Top 6" politiche *agent-specific*, cioè specificate per singola tipologia di attore e, quindi, rispettivamente per Istituzioni, Offerta e Domanda.

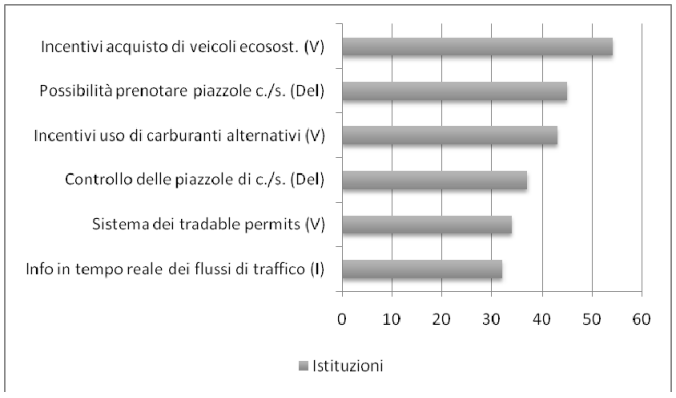


Figura 2. "Top 6" politiche più rilevanti - Istituzioni (valutazione disaggregata)

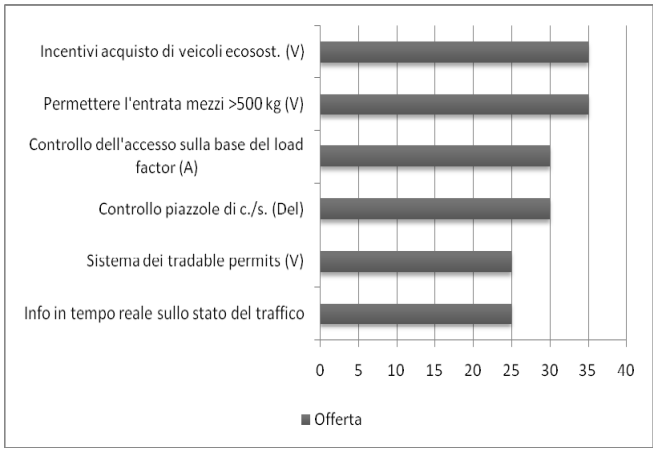


Figura 3. "Top 6" politiche più rilevanti - Offerta (valutazione disaggregata)

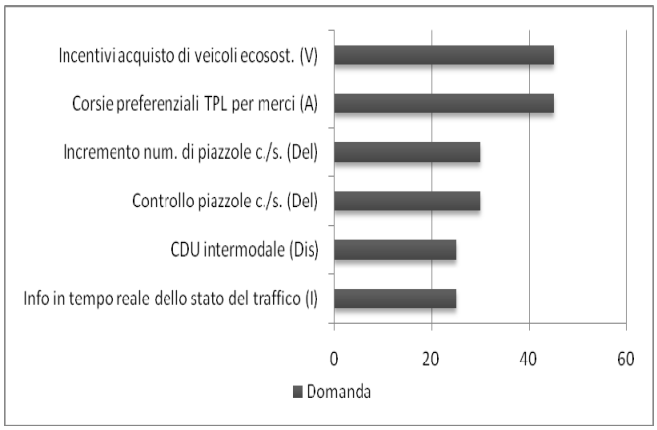


Figura 4. "Top 6" politiche più rilevanti - Istituzioni (valutazione disaggregata)

Con riferimento alle politiche preferite dai policy makers (Figura 2) emerge che le prime quattro politiche si trovano nella stessa posizione anche nell'analisi aggregata (Figura 1). Questo suggerisce che questa categoria di attori, essendo più in linea con la valutazione complessiva, potrà vedere soddisfatte le loro preferenze in misura maggiore rispetto alle altre tipologie di attori. Relativamente agli operatori di trasporto (Figura 3) le loro misure rispecchiano esigenze (operative) tipiche e proprie della specifica categoria a cui appartengono. Per quanto riguarda, invece, gli operatori economici e commerciali (Figura 4) si rileva la loro graduatoria delle politiche preferite è meno legata a proprie esigenze ma si concentra, bensì, sui problemi tipici dei vettori. Infatti tra le loro prime politiche vi sono gli incentivi all'acquisto di veicoli ecosostenibili, le corsie preferenziali per il trasporto merci e un aumento del numero di piazzole di carico e scarico della merce. Tali politiche sono orientate a facilitare il lavoro dei trasportatori e, quindi, solo indirettamente le attività commerciali ne porteranno beneficiare.

CONCLUSIONI

Per garantire il successo dell'attuazione di politiche di intervento afferenti il TUM è opportuno indagare le preferenze dei differenti stakeholders in profondità. In particolare, è importante riconoscere e comprendere adeguatamente le esigenze e problemi degli attori al fine di introdurre misure di city logistics condivise. Il presente documento esamina i problemi che affliggono il TUM nella ZTL di Roma percepiti dalle tre principali tipologie di stakeholders (Istituzioni, domanda e offerta). Dagli incontri effettuati con i principali attori si evidenziano differenze nella identificazione dei problemi. Inoltre, considerando che vi è stato un accordo generale sulle principali carenze dell'attuale regolamentazione, non si è riscontrata grande disparità nelle politiche di intervento proposte da ciascun di agente ad affrontare i problemi percepiti come più urgenti. In particolare, i risultati indicano che alcune politiche hanno un forte e condiviso sostegno. Questi includono gli incentivi all'acquisto di veicoli ecologici, l'aumento del numero e la possibilità di prenotare le piazzole di carico e scarico della merce.

Un punto cruciale emerso nel corso delle consultazioni è stato l'elevato grado di interdipendenza tra gli attori nell'introdurre misure di intervento economicamente e ambientalmente sensibili. Questa inattitudine o riluttanza ad agire indipendentemente da altri soggetti è descritto anche da Dablanc [3]. Tuttavia, i risultati ottenuti forniscono prime indicazioni ai policy makers delle politiche di intervento su cui vi è maggior consenso. Comprendere le reazioni degli operatori commerciali e dei trasportatori porterà allo sviluppo di politiche che riflettono meglio le esigenze complesse e diversificate del settore del trasporto merci. Quanto detto ribadisce l'estrema importanza di un'ampia concertazione tra gli stakeholders. Per affrontare i problemi che affliggono il TUM è necessario un approccio integrato. Quanto effettuato in questo lavoro è utile per definire politiche di *city logistics* ampiamente condivise e consapevoli dalle differenti categorie di stakeholders. Tuttavia, ulteriori ampliamenti di questa indagine dovrà riguardare l'ampliamento del numero e tipologia di attori coinvolti.

ACKNOWLEDGEMENTS

Un ringraziamento a Volvo Research and Educational Foundation, progetto SP-2007-50 nonché ai partecipanti del seminario CREI (Roma) 2009 e Kuhmo-Nectar meeting (Porto) 2009.

BIBLIOGRAFIA

1. A. Comi, P. Delle Site, F. Filippi, E. Marcucci and A. Nuzzolo, Differentiated regulation of urban freight traffic: conceptual framework and examples from Italy, 13th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, Hong Kong, China, 2009.
2. CONFETRA, Profilo dell'autotrasporto di cose in Italia, Milano, 2001.
3. L., Dablanc, Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 41(3), 280-285, 2007.
4. R. Danielis, L. Rotaris and E. Marcucci, Urban freight distribution policies and supply chains: a discussion based on Italian evidence, Mimeo, 2009.
5. DFT, A guide on how to set up and run Freight Quality Partnerships, Department for transport, http://www.freightbestpractice.org.uk/case-studies, 2007

6. F. Filippi and A. Campagna, Indagine sulla distribuzione delle merci a Roma, nell'ambito dello Studio di settore della mobilità delle merci a Roma, CTL: Centre for studies on Transport and Logistics and ATAC: Agency of mobility of Rome's municipality, 2008.
7. U. Schäffeler and J. Wichser, Trasporto urbano di merci e logistica della città, Portale Materiale didattico sui trasporti, 2003.
8. STA, Quadro conoscitivo del problema della distribuzione delle merci nel Centro Storico di Roma, Roma, 2001.
9. E. Taniguchi, R. G. Thompso, T. Yamada, Modelling city logistics, City Logistics I, Taniguchi E., R. G. Thompson, and T. Yamada, eds., Institute of Systems Science Research, Kyoto, 3–37, 1999.
10. C. Vaghi, City Logistics: la distribuzione urbana delle merci e le misure per la sua razionalizzazione, dispensa MEMIT, 2008.

MOBILITÀ, SVILUPPO E SOSTENIBILITÀ NEI CONTESTI URBANI

Gabriele Grea[1], Alberto Milotti[2]

[1]CERTeT Bocconi, gabriele.grea@unibocconi.it , [2] CERTeT Bocconi, alberto.milotti@unibocconi.it

SOMMARIO

Il sistema della mobilità di un territorio costituisce un fattore fondamentale per lo sviluppo socioeconomico e allo stesso tempo rappresenta, alla luce della propria incapacità di autoregolarsi e stabilizzarsi al livello socialmente più efficiente, un elemento di elevata criticità. Nei contesti urbani, risulta evidente come le esternalità negative generate dalla mobilità in termini di congestione, emissioni e incidentalità si pongano in antitesi rispetto alle esternalità positive generate dalle economie di urbanizzazione, minandone l'efficacia in termini di benessere complessivo. Il tema della mobilità si innesta quindi di diritto nel dibattito in merito alla sostenibilità dell'ambiente urbano, dove per sostenibilità urbana si intende, insieme alla conservazione dell'ecosistema e al contenimento dello sfruttamento di risorse e della produzione di scorie, il mantenimento di caratteristiche di attrattività e competitività in un contesto dinamico funzionali a soddisfare le necessità sociali ed economiche dei cittadini.

Il presente lavoro propone l'analisi di tre esempi di approccio al tema della mobilità urbana sostenibile tra loro differenti, accomunati dall'obiettivo finale di perseguimento di uno sviluppo urbano in grado di coniugare le caratteristiche di sostenibilità degli schemi di mobilità con un miglioramento dei livelli di competitività e attrattività del tessuto urbano sia in termini di sviluppo economico che di qualità della vita.

SOSTENIBILITÀ, SVILUPPO E MOBILITÀ URBANA

Sviluppo e sostenibilità urbana

L'attenzione nei confronti delle tematiche ambientali e della qualità della vita quali elementi centrali dello sviluppo economico è cresciuta in maniera significativa negli ultimi anni nel mondo politico, nelle organizzazioni internazionali e via via nell'opinione pubblica di diverse parti del mondo. Il tema della sostenibilità è così rientrato nell'ordine del giorno di numerose agende politiche ed è divenuto oggetto di studio a livello internazionale. Emeriti premi Nobel per l'Economia quali Amartya Sen e Joseph Stiglitz non hanno mancato di interrogarsi su queste tematiche, arrivando a concludere il primo che lo sviluppo economico non coincide con un semplice aumento del reddito, bensì con un'evoluzione della qualità della vita, e il secondo che la sostenibilità, oltre che necessaria, debba essere motore di attrattività e di innovazione per i prodotti e i processi nelle economie avanzate.

Le definizioni di sostenibilità che sono state date sono numerose ed eterogenee; tra di esse, la più nota e largamente condivisa è probabilmente quella contenuta nel Rapporto Brundtland (1988), il quale la definisce come "l'utilizzo di risorse ambientali, culturali ed economiche al tempo presente e in un determinato luogo in modo da non pregiudicarne la fruizione da parte delle generazioni future o di quelle contemporanee ma residenti in luoghi diversi".

Tuttavia, la sostenibilità rimane un principio vago, nel senso che nessuna delle sue numerose definizioni è tale da suggerirne un concreto risvolto operativo. Così, a fronte di enunciazioni di larghe vedute e istintivamente condivisibili si delinea la difficoltà di determinare obiettivi concreti, metodologie, strumenti e criteri di misurazione efficaci, di volta in volta calati nello specifico contesto di riferimento.

In generale, pare esserci consenso sulla definizione secondo cui la sostenibilità si compone di tre elementi: ambientale, economico, sociale. Tutti necessari e di per sé altrimenti non sufficienti per uno sviluppo ottimale. E poiché le città costituiscono i principali motori dello sviluppo, ambienti strategici nei quali si concentrano gli importanti benefici dalle economie di agglomerazione ma anche le forti tensioni che un'elevata concentrazione di persone, infrastrutture e attività può comportare, si ritiene particolarmente interessante considerare l'ambiente urbano quale laboratorio privilegiato per l'analisi di tale tematica.

Si intenderà dunque per sostenibilità urbana non solo la preservazione dell'ecosistema e il contenimento dello sfruttamento di risorse e della produzione di scorie, ma anche la capacità da parte del contesto urbano di continuare a mantenere le caratteristiche di attrattività e competitività in un contesto dinamico. Promuovere una crescita sostenibile, infatti, significa tener conto della qualità dell'ambiente, ma anche soddisfare le necessità sociali ed economiche espresse dalla popolazione .

Come affermano Burlando e Musso (2003), le maggiori difficoltà che si riscontrano nel tentativo di rendere operativo questo concetto derivano dall'impossibilità di massimizzare contemporaneamente le tre principali direttrici – ambientale, sociale ed economica - che lo caratterizzano. È dunque necessario operare delle scelte che necessariamente sottendono dei giudizi di valore, sufficientemente mirate per potersi tramutare in azioni concrete e al contempo sufficientemente flessibili per potersi adattare ad un contesto e a condizioni in continua evoluzione.

Il concetto di mobilità

Il tema della mobilità è certamente fra quelli che rendono più concreto il concetto di sostenibilità urbana, rappresentando una leva importante per il raggiungimento di uno sviluppo

durevole . Essa è caratterizzata da un indubbio ed elevato valore socio-economico, derivante dalla funzione caratteristica di mettere in comunicazione le persone, le merci, le idee.

Allo stesso tempo, la mobilità risulta fattore tanto fondamentale quanto critico nel momento in cui si manifesta la sua incapacità di autoregolarsi e stabilizzarsi «al livello socialmente più efficiente». La mobilità genera importanti esternalità negative (congestione, incidentalità, inquinamento atmosferico e acustico) che pesano sulla qualità della vita dei cittadini e sull'attrattività dell'ambiente urbano, compromettendo le esternalità positive generalmente addotte dalle economie di urbanizzazione.

In Italia, anche per l'anno 2007 si è verificata una crescita del cosiddetto "consumo di mobilità". In particolare, i dati dell'Osservatorio Audimob hanno mostrato come, seppure in un contesto caratterizzato da una contrazione dell'insieme della popolazione mobile , si registra la crescita del numero medio di spostamenti, del tempo speso in mobilità e dei chilometri percorsi . Questi dati forniscono una dimensione della pressione esercitata sull'ambiente dalle crescenti esigenze di mobilità (non necessariamente riconducibili a motivi di studio o lavoro, anzi sempre più legata a ragioni di svago), che in maniera sempre più rilevante vengono soddisfatte tramite l'uso di mezzi privati, in primis autovetture e motoveicoli.

L'ambiente urbano, proprio per le sue caratteristiche (concentrazione di popolazione, attività produttive e commerciali), dipende in maniera critica dal fattore mobilità e dall'esigenza di trovare il giusto equilibrio fra i benefici che essa apporta ai singoli e il benessere generale della comunità, obiettivo di base nel percorso verso uno sviluppo sostenibile. È infatti inevitabile riflettere sul fatto che la mobilità di merci e persone nei contesti urbani e metropolitani ha spesso drammatici risvolti collettivi, principalmente determinati da scelte di natura strettamente individuale .

Tali scelte non sono ad oggi classificabili in base al criterio di necessità (in senso stretto), ma risultano, piuttosto, strettamente connaturate ad elementi di valenza socio-psicologica. Infatti, l'auto oggi non è più percepita solo come strumento necessario a soddisfare il bisogno di spostarsi in maniera rapida e confortevole, ma anche come oggetto che rivela il nostro status economico e sociale.

Le sfide che un sistema di mobilità sostenibile deve sostenere in questo quadro sono sostanzialmente declinabili in tre obiettivi tra di loro fortemente correlati: a) adottare opportune misure e soluzioni per combattere le esternalità negative connesse alla mobilità, con particolare riferimento alle emissioni e alla congestione per quanto riguarda gli scenari futuri; b) contribuire a determinare una convenienza effettiva dei sistemi di mobilità di massa rispetto a quella privata sia in termini di tempo che di qualità del viaggio; c) creare i presupposti per un significativo cambio di mentalità negli utenti di mobilità, da possessori di mezzi di trasporto a utenti di servizi di mobilità.

L'APPROCCIO STRATEGICO ALLA MOBILITÀ URBANA SOSTENIBILE

Le strategie di sviluppo della mobilità urbana sostenibile, conseguentemente, dovranno porsi come obiettivo principale la definizione di sistemi di trasporto efficienti e sicuri in grado di soddisfare le esigenze di mobilità e accessibilità, coordinatamente con obiettivi di protezione dell'ambiente e contenimento e ottimizzazione dei consumi energetici, e orientate al miglioramento della qualità della vita dei cittadini e allo sviluppo sociale ed economico del territorio.

Tale impostazione è confermata e declinata a livello comunitario dal Libro Verde della Commissione Europea dal titolo "Verso una nuova cultura della mobilità urbana" (2007). L'iniziativa, che nasce dal riconoscimento di problematiche comuni a tutte le aree urbane europee e dalla conseguente necessità di integrare le soluzioni a tali criticità nell'ottica della politica europea dei trasporti, individua una serie di sfide che delineano una strategia di intervento integrata, basata sullo sviluppo di alternative efficaci alla mobilità privata (accessibili, flessibili, efficienti e sicure), e sulla promozione e la sperimentazione di tecnologie pulite (efficienza energetica, carburanti alternativi) e intelligenti (tariffazione integrata, sistemi informativi, etc.). Parallelamente, particolare attenzione è dedicata all'obiettivo strategico di individuare modalità di supporto alla creazione di una nuova cultura della mobilità urbana.

Le strategie delineate partono dal riconoscimento delle differenti dimensioni del fenomeno mobilità è delle relative problematiche di sostenibilità da soddisfare. Sarà quindi decisivo lo sviluppo, all'interno delle linee guida declinate, di progettualità e soluzioni di carattere tecnologico, normativo e operativo coerenti con la multidimensionalità degli obiettivi di mobilità sostenibile individuati.

Non solo lo sviluppo di soluzioni innovative dovrà rivolgersi ai differenti ambiti specifici che compongono il fenomeno della mobilità urbana alla luce delle differenti esigenze da soddisfare, ma soprattutto dovrà, per innescare efficaci processi virtuosi, tenere in considerazione la complessità del concetto di sostenibilità e le relative sfaccettature di carattere ambientale, sociale, economico e psicologico.

Coerentemente con tale impostazione si propone di seguito l'analisi di tre esempi di approccio al tema della mobilità urbana sostenibile tra loro differenti per ambito di applicazione, caratteristiche della mobilità coinvolta e effetti ed impatti generati. L'elemento comune riscontrabile nell'esemplificazione è dato essenzialmente dal modo in cui i tre approcci contribuiscano all'obiettivo comune di uno sviluppo urbano in grado di coniugare le caratteristiche di sostenibilità degli schemi di mobilità con un miglioramento dei livelli di competitività e attrattività del tessuto urbano sia in termini di sviluppo economico che di qualità della vita.

Sistemi di propulsione innovativi, carburanti alternativi e scelte di rinnovo delle flotte

Da tempo le case automobilistiche hanno compreso a livello mondiale come il terreno dell'auto ecologica rappresenti il futuro del mercato. Conseguentemente, grazie anche agli ingenti capitali dedicati dal settore alla ricerca e sviluppo, lo studio di propulsioni e carburanti a basso e nullo impatto ambientale ha fatto passi rilevanti evolvendosi in differenti direzioni.

L'evoluzione dei sistemi propulsivi tradizionali e lo sviluppo di quelli maggiormente innovativi porterà ad un sempre maggiore sviluppo di veicoli elettrici mentre veicoli alimentati a gas naturale e biocarburanti rappresentano già oggi una realtà in forte crescita. La dinamica effettiva dei parchi veicolari nel breve e medio periodo sarà condizionata da una serie di fattori contingenti quali l'autonomia dei veicoli e la disponibilità delle reti distributive.

L'obiettivo ultimo rimane quello di raggiungere la massima diffusione per sistemi propulsivi che combinino la massima

efficienza energetica e il minimo impatto ambientale. E a tale proposito occorre sottolineare l'importanza del computo del costo energetico e delle relative emissioni prodotte secondo una logica *well to wheel*, ovvero dalla fonte primaria al veicolo, che vede dunque nell'utilizzo combinato di fonti rinnovabili (biogas e biomasse, energia eolica, fotovoltaica, idroelettrica), vettori energetici da esse ricavabili (gas naturale, biocarburanti, energia elettrica da fonti rinnovabili e idrogeno), e adeguati sistemi di propulsione innovativi (ibridi, elettrici alimentati da batterie e da celle a combustibile) i paradigmi dell'auto del futuro.

Un'analisi condotta a livello nazionale (CERTeT, 2009) su un panel di grandi decisori in materia di acquisto e rinnovo di parchi veicolari, sviluppata a partire dall'ipotesi portante secondo cui tali soggetti, grazie alla gestione strategica delle flotte e ad una visione di lungo periodo ad essa connaturata, siano in grado di influenzare lo sviluppo del mercato e dunque la composizione del parco veicolare complessivo, contribuendo in maniera decisiva all'identificazione dei driver di scelta e allo sviluppo dei settori di mercato proprie dei veicoli maggiormente rispondenti alle esigenze future, fornisce alcune indicazioni interessanti rispetto ai trend evolutivi in atto.

L'analisi dei settori individuati con il ruolo di potenziali decisori ha evidenziato caratteristiche comuni in merito alla crescente centralità delle questioni ambientale ed energetica rispetto a modelli di scelta precedenti, che vedevano un peso maggiore dell'immagine e delle caratteristiche tecniche tradizionali dei mezzi e di costo di gestione del parco quale driver di scelta principali.

Allo stesso tempo, è emerso come per buona parte dei settori considerati le questioni divenute centrali non si pongano in antitesi rispetto ai driver tradizionali, quanto piuttosto siano da considerarsi in sinergia in particolare con le necessità di controllo e contenimento dei consumi energetici e dei costi.

I risultati suggeriscono alcune considerazioni di fondo, che contribuiscono a delineare le caratteristiche di potenziali scenari futuri di evoluzione di sviluppo di parchi veicolari sempre più efficienti dal punto di vista ambientale ed energetico. Gli effetti delle dinamiche evolutive di breve periodo portano benefici ambientali apprezzabili, pur mantenendosi nell'ambito di sistemi ad alimentazione tradizionali o alternativi ad oggi in via di sviluppo sul mercato.

In sintesi, tre fattori (parallelamente alle prospettive di sviluppo tecnologico delle propulsioni definite in precedenza) emergono quali decisivi per l'evoluzione efficiente dei parchi veicolari in grado di generare effetti durevoli in termini di sostenibilità, il primo dei quali è rappresentato dall'introduzione e dallo sviluppo sul mercato di tecnologie alternative sempre più affidabili ed efficaci, affiancate dalla realizzazione di reti energetiche e di distribuzione in grado di sostenerne il potenziale di sviluppo.

Il secondo fattore, particolarmente legato all'opportunità di contenere le emissioni generate dal settore a livello globale, è legato all'introduzione di schemi di mobilità razionali e sistemi infrastrutturali che consentano un contenimento delle percorrenze complessive e soprattutto una riduzione dei consumi, anche grazie alla diminuzione dei fenomeni di congestione.

Infine ultimo ma non meno importante elemento di attenzione, strettamente legato al fattore precedentemente esposto, è rappresentato dall'introduzione di elementi di cambiamento culturale rispetto al tema della mobilità privata: tra i decisori emerge infatti la consapevolezza di una rilevanza decrescente delle questioni di immagine intese in senso tradizionale, legate al possesso e all'utilizzo di una autovettura, per fare posto a una nuova visione in grado di inglobare nel concetto di mobilità privata le istanze di sostenibilità e minimizzazione degli impatti sull'ambiente e dell'utilizzo di risorse; la trasmissione di questa visione di fondo dai grandi decisori ai singoli utenti di mobilità privata, affiancata alla promozione di sistemi e tecnologie coerenti e commisurate al proprio schema di mobilità, costituisce un elemento chiave per lo sviluppo di una mobilità privata sempre più efficiente e sostenibile.

Un punto a sfavore della mobilità privata rimane certamente – anche considerando in una prospettiva di lungo periodo lo sviluppo e la massiccia entrata sul mercato di tecnologie a zero emissioni – quello della congestione e dei suoi costi, sebbene su questo si sconti il differenziale di percezione del tempo speso in trasferimenti con auto propria rispetto a quelli effettuati, specie in ambito urbano, con mezzi pubblici.

Detto questo, la mobilità privata rimane un tassello fondamentale nello sviluppo di sistemi di mobilità locale integrati e sostenibili in una logica di comodalità , ovvero nel processo di individuazione di sinergie tra le modalità di trasporto in grado di disegnare un sistema efficiente a servizio della domanda di mobilità.

Misure regolamentari e opzioni tecnologiche disponibili devono contribuire a tale processo, per garantire lo sviluppo di sistemi bilanciati nell'utilizzo delle differenti forme di mobilità e sostenibili.

La tecnologia e il futuro del trasporto pubblico

Prendendo spunto dalle riflessioni conclusive del paragrafo precedente, il secondo esempio di approccio alla mobilità sostenibile in un'ottica di azioni integrate per la gestione della complessità del fenomeno è rappresentato dallo sviluppo di una strategia applicazione di strumenti tecnologici per il miglioramento della qualità dei servizi di mobilità collettiva.

Il trasporto pubblico locale rappresenta indubitabilmente la spina dorsale dell'approccio strategico alla mobilità, e costituisce allo stesso tempo uno degli anelli deboli della catena in relazione al riscontro di inefficienze nella gestione delle modalità di offerta ma anche e soprattutto ad un gap di competitività rispetto alla mobilità privata legato prevalentemente alla percezione dei livelli qualitativi.

Diverse opzioni tecnologiche sono oggi percorribili e dovranno in futuro essere percorse per arrivare a rendere la mobilità collettiva maggiormente attrattiva e competitiva, in virtù dei benefici ambientali che essa è in grado di generare.

La mobilità del futuro dovrà puntare inevitabilmente su più alti livelli di comfort ed efficaci strumenti di comunicazione che consentano all'utente di conoscere la propria posizione, i tempi di viaggio attesi e le interconnessioni e coincidenze disponibili con altri elementi della rete; ma soprattutto dovrà essere basata su sistemi di trasporto rapidi ed affidabili, che viaggiano in sedi protette che minimizzano le situazioni di promiscuità con la mobilità privata, e hanno la precedenza su di esse grazie a sistemi di prioritizzazione per la gestione degli incroci. Infine, ultimo ma niente affatto meno importante, i servizi dovranno essere coordinati in network fortemente integrati che comprendono diverse modalità quali bus a basso impatto ambientale, metropolitane, parcheggi di interscambio; e ancora taxi ecologici, servizi flessibili per la gestione della domanda debole, servizi di car e bike sharing avanzati. Infine, i sistemi di trasporto del futuro grazie al connubio tra

complessità e flessibilità reso possibile dai software di ottimizzazione e controllo della rete e dei percorsi dovranno essere in grado di far coesistere una molteplicità di flussi di differente raggio e provenienza a partire da una gestione ottimale dei nodi del sistema.

Si è qui delineato un sistema futuro nel quale lo sviluppo tecnologico contribuirà in maniera decisiva nel contrastare le esternalità ambientali negative prodotte dalla mobilità. Di fatto, tale scenario non risolve le problematiche legate alla desiderabilità, alle sinergie e alla scelta tra mobilità pubblica e privata. E cosa più importante, al quadro delineato manca l'importante tassello rappresentato dall'urgenza e dalla necessità di compiere oggi scelte di assetto e di governo della mobilità destinate ad impattare sul futuro prossimo dell'ambiente urbano. Il percorso verso schemi di mobilità efficienti, sostenibili e allo stesso tempo rispondenti alle esigenze della domanda non è infatti scevro da conflittualità, scelte e inevitabili sacrifici, come potrebbe sembrare proiettando semplicemente i risultati dello sviluppo tecnologico su un orizzonte temporale di medio-lungo periodo.

Provando a disegnare uno scenario di sviluppo realistico e plausibile nel breve e medio periodo, emerge la necessità di compiere scelte coerenti con l'obiettivo di sviluppare sistemi di mobilità sostenibile fondati su una effettiva competitività del trasporto pubblico rispetto al trasporto privato, di cui di seguito si propongono a titolo non esaustivo alcune esemplificazioni.

In primis, un elemento fondamentale per il successo di un'offerta di mobilità efficace è costituito dalle misure regolamentari funzionali alla gestione strategica del traffico generato dalla mobilità privata e delle conseguenze sull'efficienza dei sistemi di mobilità collettiva: 1) la prioritizzazione delle reti di trasporto pubblico rispetto ai flussi viabilistici privati, attraverso la realizzazione di corsie preferenziali e sistemi di gestione semaforica efficaci (si vedano a proposito i sistemi di Bus Rapid Transit implementati a livello internazionale), rappresenta un primo fattore critico di successo in tutte quelle realtà in cui la sinergia tra reti metropolitane e ferroviarie sotterranee e reti di superficie costituisce l'ossatura del sistema di offerta; 2) il riconoscimento e la quantificazione economica delle esternalità generate dalla mobilità privata attraverso sistemi satellitari inoltre rappresenterebbero un utile strumento di riequilibrio modale nelle aree particolarmente congestionate, sulla falsa riga degli esempi di applicazione di una congestion charging flessibile, basata sulle effettive percorrenze piuttosto che sul semplice accesso a determinate aree, sull'esempio di quanto in via di applicazione a livello nazionale sul sistema autostradale olandese (il sistema satellitare controlla le percorrenze effettive di ciascun veicolo che vengono sottoposte ad un corrispondente schema di tassazione, il cui effetto atteso è una diminuzione delle percorrenze complessive).

In seconda battuta, la competitività del sistema di mobilità collettiva si raggiunge non solo attraverso limitazioni alla "concorrenza" delle auto, ma anche attraverso l'implementazione di un sistema efficiente basato a) su una forte integrazione tra mezzi attraverso il potenziamento di nodi di interscambio e b) sulla presenza di flussi informativi per l'ottimizzazione della rete di offerta tra servizi "dorsali" e servizi innovativi e flessibili, e per la pianificazione ottimale del viaggio da parte degli utenti; un pacchetto di misure implementabile attraverso lo sviluppo di piattaforme informative e tecnologiche, a patto che i sistemi vengano alimentati con informazioni complete in merito ai flussi di mobilità e alle caratteristiche dell'offerta.

Attrattività e competitività del territorio, le opportunità dei nuovi servizi AV

Lo sviluppo di servizi ferroviari ad Alta Velocità costituisce un elemento ad elevato valore aggiunto per il sistema di mobilità sostenibile di un'area metropolitana, proporzionalmente al grado di integrazione conseguito con i servizi locali e la conseguente capacità di aumentare l'accessibilità del territorio e la connettività tra reti lunghe e reti brevi.

L'analisi della letteratura in tema di impatto dei sistemi ferroviari AV evidenzia per quanto riguarda le realtà urbane individuate come nodi la sostanziale difficoltà nel determinare in modo univoco una corrette quantificazione degli effetti, dal momento che ad essa concorrono numerosi elementi legati alle caratteristiche economiche e sociali dei territori interessati. Se infatti, come si è effettivamente verificato in alcuni casi a livello europeo, la città riesce a sfruttare i vantaggi dell'accessibilità, attraendo nuove attività economiche e sviluppando il terziario, vi saranno significative ricadute territoriali positive di carattere economico e sociale ad esso correlate.

Un primo effetto "territoriale" particolarmente significativo conseguente all'attivazione di linee AV è la contrazione dello spazio prodotta da una circolazione più veloce e con minori costi relativi . Ciò implica la definizione di una nuova mappa geografica in cui le distanze calcolate in chilometri non corrispondono più solo alle distanze espresse in termini chilometrici ma anche temporali. Le città localizzate su una linea della rete ad AV diventano "più vicine" e ciò genera notevoli conseguenze in termini sociali, economici e territoriali. Secondo molti studiosi, una delle principali conseguenze di questo fenomeno è l'aumento della competitività delle città e delle regioni servite dall'AV, poiché l'annullamento delle distanze comporta un allargamento del mercato di riferimento, con fenomeni di maggiore specializzazione e conseguente ottenimento di economie di scala.

Tra i benefici più rilevanti si sottolineano i benefici indotti sul mercato del lavoro: al ridursi dei costi del trasporto il mercato del lavoro diventa più ampio sia dal lato della domanda (le imprese hanno accesso ad un bacino più ampio) sia dal lato dell'offerta (diminuiscono i tempi di viaggio dei pendolari). Una immediata conseguenza dell'ampliamento del mercato del lavoro potrebbe essere l'aumento della produttività delle imprese che potrebbero beneficiare di livelli di salario più bassi e acquisire forza lavoro più qualificata. Inoltre, il miglioramento delle infrastrutture di trasporto renderebbe possibile ai lavoratori provenienti da aree a deficit di occupazione l'accesso ad aree a deficit di lavoro con guadagni per il lavoratore, l'imprenditore e il settore pubblico che beneficerebbe di maggiori entrate fiscali. La facilità negli spostamenti potrebbe anche incoraggiare i pendolari a lavorare per più ore, anche se l'impatto maggiore sembrerebbe derivare dagli spostamenti dei lavoratori da attività meno produttive ad attività più produttive .

Accanto agli effetti sul mercato del lavoro gli effetti sulle trasformazioni urbane assumono un'importanza fondamentale: l'Alta Velocità diventa l'occasione per un processo di riassetto urbano in cui ampie aree diventano oggetto di radicale trasformazione dell'assetto urbano della città: si definiscono nuove polarità che modificano le città e i loro ambienti. A

titolo esemplificativo citando il caso italiano, a Novara il progetto dell'AV ha innescato il processo di trasformazione di un'area molto ampia della città che comprende due quartieri a Nord-Est e arriva fino ai confini del vicino comune di Galliate dove, appunto, è prevista la nuova stazione AV in connessione con la nuova stazione delle Ferrovie Nord Milano. Gli interventi sulle aree dismesse e su quelle liberate dai binari prevedono la realizzazione di 450.000 mq di nuova slp per immobili residenziali, produttivi e di terziario con la creazione di un Polo tecnologico di ricerca e sviluppo e di nuovo Polo universitario. A Milano, la razionalizzazione del nodo ferroviario metterà a disposizione oltre un milione di mq, collocati per lo più lungo le linee ferroviarie e quindi dotate di una elevata accessibilità. A Napoli la realizzazione della nuova stazione di Afragola rappresenta una rilevante opportunità per lo sviluppo e il recupero di tutta l'area circostante, area che interessa altri quattro comuni a nord del capoluogo campano.

Proprio le stazioni sono l'elemento centrale dei processi di riqualificazione urbana indotti dall'alta velocità, in primo luogo perché aumenta il loro livello di accessibilità e, di conseguenza, l'accessibilità complessiva dell'area intorno; in secondo luogo perché adeguare le stazioni esistenti e costruirne di nuove porta a ripensare alla tipologia stessa di questi luoghi, non più destinati alla sola mobilità e al solo passaggio. A seguito dell'accresciuta attrattiva degli spazi e dell'aumento di servizi diversi da quello ferroviario, la stazione e le aree ad essa circostanti non sono più luoghi destinati alla sola mobilità e al solo passaggio, ma poli di nuova centralità per la città grazie a servizi commerciali, culturali e per il tempo libero.

RIFLESSIONI CONCLUSIVE

L'eterogeneità degli esempi proposti, che concorrono alla formulazione di uno schema di mobilità in ambito urbano in grado di coniugare sostenibilità e competitività, suggerisce alcune indicazioni di metodo sull'approccio strategico alla mobilità sostenibile da adottare e sui suoi fattori critici di successo.

Le strategie di gestione degli impatti ambientali, sociali ed economici della mobilità sull'ambiente urbano devono saper generare nuove opportunità di sviluppo economico sostenibile e per una migliore qualità della vita.

È altrettanto vero che il processo di scelta in materia di mobilità urbana coinvolge una pluralità degli *stakeholder* caratterizzati da obiettivi e utilità che devono trovare un equilibrio convergente. Da un lato, le Amministrazioni Pubbliche devono perseguire la riduzione della congestione e dell'inquinamento, attraverso strumenti e misure che contribuiscano all'ottimizzazione e alla riduzione delle percorrenze complessive e dei veicoli circolanti. Parallelamente, il tessuto imprenditoriale ha tra le sue priorità il perseguimento di alti livelli di competitività, la gestione della crescente centralità delle questioni ambientale ed energetica nelle funzioni di produzione, l'ottimizzazione del valore del tempo. Infine i cittadini perseguono modelli di comportamento e di consumo funzionali all'innalzamento della qualità della vita, il miglioramento dell'accessibilità e la scelta di opzioni di mobilità efficienti e di qualità per motivi di lavoro, studio, e per il tempo libero.

Gli obiettivi compositi che orientano le scelte in materia di mobilità devono convergere sul terreno comune della sostenibilità, per contribuire al processo di riqualificazione e sviluppo durevole dell'ambiente urbano.

BIBLIOGRAFIA

1. Brundtland G.H. e al., Il futuro di noi tutti. Rapporto della commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo, Milano, Bompiani, 1988;
2. Burlando C., Musso E., Mobilità urbana e sostenibilità, in L. Senn e M. Percoco (a cura di), Trasporti e sostenibilità ambientale, Egea, Milano, 2003;
3. Commissione Europea, Libro Bianco, La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte, COM(2001) 370;
4. Commissione Europea, Libro Verde, Verso una nuova cultura della mobilità urbana, COM(2007)551;
5. Santarelli M., Studio comparativo delle emissioni e del bilancio energetico dei vari sistemi di mobilità, Fondazione Telios 2009;
6. CERTeT Centro di Economia Regionale, dei Trasporti e del Turismo Università Commerciale L. Bocconi, Politiche energetiche e parco veicolare, prospettive e strategie di rinnovo dei principali decisori – Rapporto di ricerca del Network Mobilità Urbana Sostenibile 2009
7. Centro studi sui sistemi di trasporto (CSST), Mobilità e ambiente in una visione integrata di sistema - Ricerca promossa da Promotor International in collaborazione con Anfia e Unrae, Bologna, 2007;
8. Corporate Vehicle Observatory, Barometro Italia 2008;
9. Creaco S., Lo sviluppo sostenibile a livello urbano, in Economia delle fonti di energia e dell'ambiente, Anno XLIII – N.1/2000, Osservatorio energetico ed ambientale, IEFE, FrancoAngeli, Milano, 2000;
10. Ente Nazionale Energia e Ambiente (Enea), Rapporto Energia e Ambiente 2007:analisi e scenari, Roma, 2008;
11. Euromobility, La mobilità sostenibile in Italia: indagine sulle principali 50 città, Roma, 2008;
12. Fondazione Caracciolo, Mia carissima automobile, Roma, 2006.
13. Capello, R., Gillespie, A. "Transport, communications and spatial organisation: future trends and conceptual frameworks" in Giannopoulos, G., Gilespie, A., "Transport and communication innovation in Europe", Behalven Press, Londra, pag. 24-56, 1993
14. Vickerman, Roger "Indirect and wider economic impacts of High Speed Rail", Kent, Canterbury

PREMIO "MAURO FELLI"

Albo d'Oro

Premio “Mauro Felli”

Albo d’Oro

Il Premio “Mauro Felli” è giunto alla settima edizione e nasce per onorare la memoria del prof. Mauro Felli, fondatore e primo Direttore del CIRIAF.

Il premio consiste nell’assegnazione di una Borsa di studio destinata a giovani laureati o ricercatori che si sono distinti in ricerche riguardanti gli effetti sulla salute derivanti dall’esposizione ad agenti fisici.

1° edizione, aprile 2001

Vincitore: **dott.*ssa Patrizia Rinaldi***

Tema: “Impatto degli eventi sismici sulla salute della popolazione senile”

Gruppo di Ricerca: Sezione medica del CIRIAF
“Effetti gerontologici e geriatici”
dell’Università degli Studi di Perugia
Coordinatore: *prof. Umberto Senin*

2° edizione, aprile 2002

Vincitore**: *dott.ssa Simona Ronchetti***

Tema: “Ruolo di GITR nel sistema immunitario”

Gruppo di Ricerca: Sezione medica del CIRIAF
“Farmacologia, tossicologia e chemioterapia”
dell’Università degli Studi di Perugia
Coordinatore: *prof. Carlo Riccardi*

3° edizione, aprile 2003

Vincitori**:** ***dott.ssa Ida Elena Sapia*** e ***dott. Salvatore Messina***

1) ***dott.ssa Ida Elena Sapia***

Tema:"Parametri microclimatici all'interno di case temporanee (containers) e la loro influenza sulla salute e sul benessere degli occupanti"

Gruppo di Ricerca: Sezione medica del CIRIAF
"Tossicologia ed epidemiologia professionale
ed ambientale"
Coordinatore: *prof. Giuseppe Abbritti*

2) ***dott. Salvatore Messina***

Tema: "Studio longitudinale su bambini bielorussi provenienti dall'area di Chernobyl, mediante esami ecografici, dosaggi ematici, misure antropomorfiche, per la valutazione dell'impatto delle radiazioni ionizzanti dopo l'esplosione del reattore nella Centrale nucleare"

Gruppo di Ricerca: Sezione medica del CIRIAF
"Effetti Radiologici"
Coordinatore: *prof. Renato Palumbo*

4° edizione, aprile 2004

Vincitore: ***dott. Danilo Castellani***

Tema: "Influenza ambientale nella regolazione delle patologie gastrointestinali: effetto della supplementazione alimentare nel paziente affetto da epatocarcinoma".

Gruppo di Ricerca: Università degli Studi di Perugia
Dipartimento di Medicina Clinica e Sperimentale
Sezione di "Gastroenterologia "
Coordinatore*: prof. Antonio Morelli*

5° edizione, aprile 2005

Vincitori**:** ***dott.ssa Vincenza Nardicchi*** e ***dott. ing. Maria Letizia Boscia***

1) ***dott.ssa Vincenza Nardicchi***

Tema: "Rat Brain cortex mitochondria release type II-A phospholipase A_2 under reduced membrane potential"

Gruppo di Ricerca: Università degli Studi di Perugia
Facoltà di Medicina e Chirurgia
Dipartimento di Medicina Interna
Sezione di Biochimica
Coordinatore*: prof. Gianfrancesco Goracci*

2) ***dott. ing Maria Letizia Boscia***

Tema: "Valutazioni degli impatti della discarica di Bellolampo sulla qualita' dell'aria urbana di Palermo"

Gruppo di Ricerca: Università degli Studi di Palermo
Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali
Coordinatore: *prof. Gianfranco Rizzo*

6° edizione, aprile 2006

Vincitore**:** ***dott. Giovanni Roti***

Tema: "DHPLC: a valid approach for identifying NPM1 mutations in acute myeloid leukemia"

Gruppo di Ricerca: Sezione medica del CIRIAF
"Effetti Ematologici e Immunologici"
Università degli Studi di Perugia
Coordinatore*: prof. Massimo Fabrizio Martelli*

7° edizione, marzo 2007

Vincitore**:** ***dott.ssa Francesca Gonfia***

Tema: "Effetto inibitorio di bacilli di differente specie sull'attività biologica di un nitroarene (4-NQO) e di un agente alchilante (MNNG)."

Gruppo di Ricerca: Università degli Studi di Perugia
Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali
Dipartimento di Biologia Cellulare e Molecolare
Coordinatore: *prof. Francesco Bistoni*

8° edizione, aprile 2008

Vincitori**:** ***dott. Paolo Polinori*** e ***ing. Rosaria Ippolito***

1) ***dott. Paolo Polinori***

Tema: "The willingness to pay for renewable energy sources (RES): the case of Italy with different survey approaches. An introductory analysis"

Gruppo di Ricerca: Università degli Studi di Perugia
Facoltà di Scienze Politiche
Coordinatore*: prof. Carlo Andrea Bollino*

2) ***ing Rosaria Ippolito***

Tema: "Analisi parametrica e modellizzazione di aree interessate da emissioni radiochimiche, programmate o incidentali, da impianti nucleari: valutazioni preventive d'impatto radiologico sui gruppi critici della popolazione"

Gruppo di Ricerca: Università degli Studi di Roma "La Sapienza"
Facoltà di Ingegneria
Coordinatore: *prof. Maurizio Cumo*

9° edizione, aprile 2009

Vincitore**:** ***dott. Fabrizio Fioretti***

Tema: "I fattori di rischio ambientali nella patologia oncologica dell'apparato genito-urinario e nell'infertilità maschile"

Gruppo di Ricerca: Università degli Studi di Perugia
Clinica Urologica e Andrologica
Coordinatore*: prof. Massimo Porena*

INDICE AUTORI

A

Angelucci M. ..... p. 241
Asdrubali F. ..... p. 63, 133, 379
Atzori D. ..... p. 173

B

Badagliacca A. ..... p. 151
Bagagli M. ..... p. 83
Baglioni O. ..... p. 133
Baldinelli G. ..... p. 63
Barbalace A. ..... p. 89
Barbanera M. ..... p. 277, 301
Barbieri E. ..... p. 285
Bellomini R. ..... p. 193
Belloni E. ..... p. 179
Bennati L. ..... p. 133
Bertolo A. ..... p. 9
Betti R. ..... p. 173
Bianchi F. ..... p. 63
Bianchi D. ..... p. 219
Bigliotto C. ..... p. 9
Bilotti F. ..... p. 297
Biorci E. ..... p. 291
Blomberg Stathopoulos A. ..... p. 367, 391
Bonavita A. ..... p. 29
Brambilla G. ..... p. 199
Buonanno G. ..... p. 253
Buratti C. ..... p. 29, 105, 179, 379

C

Cannistraro G. ..... p. 47, 117
Carletti C. ..... p. 63, 111
Castellani B. ..... p. 331, 337
Castelluccio M. ..... p. 117
Cattani L. ..... p. 69, 77
Cavalaglio G. ..... p. 321, 343
Cipriani F. ..... p. 55
Coffano C. ..... p. 291
Colaiuta E. ..... p. 259
Conte A. ..... p. 139, 145, 285
Coppi M. ..... p. 151, 317
Cotana F. ..... p. 247, 277, 301, 337, 343
Cotana S. ..... p. 321
Crocchianti S. ..... p. 241
Curcuruto S. ..... p. 173

D

D'Alessandro F. ..... p. 379
De Carli M. ..... p. 9
de Lieto Vollaro A. ..... p. 313
de Lieto Vollaro E. ..... p. 313
de Lieto Vollaro R. ..... p. 313
De Santoli L. ..... p. 47
Dellacasa G. ..... p. 219
Di Mulo A. ..... p. 263, 269
Di Rosa P. ..... p. 297

E

Erbetta L. ..... p. 219, 291

F

Faleri M. ..... p. 41
Fantozzi F. ..... p. 301
Fasola Bologna L. ..... p. 277
Filipponi M. ..... p. 133, 337
Fiorentino M. ..... p. 163
Franceschini G. ..... p. 209
Franzitta V. ..... p. 3

G

Galatioto A. ..... p. 21
Galli G. ..... p. 313, 349
Garbero V. ..... p. 219
Gatta V. ..... p. 391
Gentili B. ..... p. 193
Germanò D. ..... p. 117
Gianelli F. ..... p. 29
Giuliobello M. ..... p. 331
Goretti M. ..... p. 105
Grea G. ..... p. 397
Grimaz S. ..... p. 209
Guattari G. ..... p. 297

L

Lanciotti E. ..... p. 173
Lisiero A. ..... p. 185
Lo Curcio F. P. ..... p. 3
Luci C. ..... p. 15, 163, 307
Lupo M. ..... p. 263, 269
Luzzi S. ..... p. 193

M

Magnani L. ..... p. 69, 77
Magrini A. ..... p. 69, 77
Marchetti G. ..... p. 83
Marcucci E. ..... p. 391
Mariani R. ..... p. 385
Mariconte R. ..... p. 151
Marino C. ..... p. 225
Marsico G. ..... p. 173
Massimo D. E. ..... p. 89
Merico M. C. ..... p. 105, 247
Milone A. ..... p. 21, 123
Milone D. ..... p. 99, 123

Milotti A. ..... p. 397
Moncada Lo Giudice G. ..... p. 179
Moretti E. ..... p. 179, 379

N

Natale R. ..... p. 193
Nicoletti Ge. ..... p. 231, 355
Nicoletti Gi. ..... p. 231, 355
Nicolini A. ..... p. 331
Nucara A. ..... p. 3, 225

P

Papa A. ..... p. 157
Parisato E. ..... p. 291
Pascolo P. ..... p. 209
Pera M. ..... p. 205
Persiani D. ..... p. 235
Petrozzi A. ..... p. 321
Pianigiani F. ..... p. 241
Pierangioli L. ..... p. 111
Pietrafesa M. ..... p. 225
Pitruzzella S. ..... p. 21, 99, 123
Plutino D. ..... p. 117
Prignani P. ..... p. 235
Primieri S. ..... p. 15
Pudano A. ..... p. 225

Q

Quintino A. ..... p. 317

R

Raffellini G. ..... p. 95
Ragni R. ..... p. 15, 307
Reale F. ..... p. 373
Remigi F. ..... p. 169
Riccardi F. ..... p. 343
Ricciardi P. ..... p. 29
Rinaldi S. ..... p. 247, 277
Romagnolo A. ..... p. 47
Romagnoni P. ..... p. 185
Rossi F. ..... p. 331, 337
Rotaris L. ..... p. 391

S

Sacchetti F. ..... p. 173
Salata F. ..... p. 317
Sapia C. ..... p. 327
Scaccianoce G. ..... p. 3
Schiavoni S. ..... p. 133, 379
Scoccia M. ..... p. 385
Sciurpi F. ..... p. 63, 111
Sepulcri D. ..... p. 35, 169
Silvaggio R. ..... p. 173
Sisti N. ..... p. 385
Sozio G. ..... p. 327
Spinazzè R. ..... p. 35
Stabile L. ..... p. 253
Staiti C. ..... p. 117
Strada M. ..... p. 185
Stragapede A. ..... p. 285
Strani G. ..... p. 15, 163, 307

T

Ticali D. ..... p. 247, 263, 269
Toscano A. ..... p. 297
Tripodi M. ..... p. 3, 225

U

Urbani M. ..... p. 41

V

Valeri E. ..... p. 363, 391
Vallati A. ..... p. 349
Vecchiocattivi M. ..... p. 241
Vegni L. ..... p. 297
Venditti A. ..... p. 151
Verardi P. ..... p. 199
Vergoni M. ..... p. 41
Versiglioni M. ..... p. 343
Verza S. ..... p. 185
Villi G. ..... p. 9
Viola A. ..... p. 253

Z

Zulato F. ..... p. 169