

# 2007 CONGRESSO NAZIONALE CIRIAF

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

ATTI

Sviluppo SOSTENIBILE, TUTELA dell'AMBIENTE  
E della SALUTE UMANA



PERUGIA, 30-31 MARZO 2007

In copertina:

**Gerardo Dottori** (Perugia 1884-1977)

*“Esplosione”* (1917) Olio su Tela

Collezione privata

By Courtesy

Archivi Gerardo Dottori - Perugia

# 7° CONGRESSO NAZIONALE CIRIAF

con il patrocinio di

**APAT**

Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici

**ARPA Umbria**

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale

## **Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana**

Perugia, 30 - 31 marzo 2007  
Facoltà di Ingegneria

Morlacchi Editore

Si ringraziano per il loro contributo:

**Università degli Studi di Perugia**

**Colacem S.p.A.**

**Sa.Me.** - Domus Protegit

**Tecnotermica Servizi s.r.l.**

---

Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2007.

ISBN 978-88-6074-089-2 (print)

ISBN 978-88-9392-182-4 (online)

L'edizione digitale on-line del volume è pubblicata ad accesso aperto su [www.morlacchilibri.com](http://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.

© 2007 Morlacchi Editore University Press

Pubblicato da Morlacchi Editore University Press, Piazza Morlacchi 7/9, 06123 Perugia  
[www.morlacchilibri.com](http://www.morlacchilibri.com)

## COMITATO SCIENTIFICO E ORGANIZZATORE

prof. Gino Moncada Lo Giudice (Presidente)

prof. Giuseppe Abbritti  
prof. Francesco Asdrubali  
prof. Giampaolo Asdrubali  
prof. Raffaele Balli  
prof. Giorgio Beccali  
prof. Gianni Bidini  
prof. Francesco Bistoni  
prof. Cinzia Buratti  
prof. Pietro Burrascano  
prof. Ermanno Cardelli  
prof. Giampaolo Maria Cogo  
prof. Massimo Coppi  
prof. Corrado Corradini  
prof. Franco Cotana  
prof. Andrea de Lieto Vollaro  
prof. Umberto Di Matteo  
prof. Fabrizio Figorilli

prof. Giorgio Galli  
prof. Giorgio Guattari  
prof. Franco Gugliermetti  
prof. Enrico Latrofa  
prof. Edoardo Marcucci  
prof. Massimo Fabrizio Martelli  
prof. Angelo Milone  
prof. Franco Moriconi  
prof. Antonio Ponticiello  
prof. Edvige Pucci  
prof. Giorgio Raffellini  
prof. Carlo Riccardi  
prof. Federico Rossi  
prof. Umberto Senin  
prof. Mauro Strada  
prof. Lucio Vegni

## SEGRETERIA ORGANIZZATIVA

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



## PREFAZIONE

Il Congresso Nazionale CIRIAF, nato per costituire un momento di incontro e di scambio culturale per le diverse Unità Operative del CIRIAF, ha visto negli anni crescere la partecipazione sempre più qualificata di ricercatori di diversi enti di ricerca ed istituzioni ed è diventato un punto di riferimento per coloro che sono impegnati a livello nazionale nella ricerca sui temi dello sviluppo sostenibile, della tutela dell'ambiente e della salute umana.

La VII edizione del Congresso Nazionale CIRIAF è caratterizzata da un'ampia partecipazione, come testimoniato dalle 61 memorie di 167 autori, articolate in 10 sessioni:

- *Inquinamento acustico e da vibrazioni.*
- *Inquinamento da campi elettromagnetici.*
- *Qualità dell'ambiente costruito e inquinamento indoor.*
- *Sviluppo sostenibile e qualità dell'ambiente.*
- *Fonti energetiche rinnovabili .*
- *Efficienza dei processi di conversione energetica.*
- *Modelli di simulazione ambientale.*
- *Inquinamento atmosferico.*
- *Clima e cambiamenti climatici.*
- *Inquinamento da sistemi di trasporto e mobilità sostenibile.*

Oltre alle tradizionali tematiche, è da sottolineare l'introduzione delle due sessioni *Fonti energetiche rinnovabili* e *Clima e cambiamenti climatici*, argomenti di grande attualità, in merito ai quali sono pervenuti numerosi ed autorevoli contributi.

Come di consueto nell'ambito del Congresso, per onorare la memoria del fondatore e primo Direttore CIRIAF, sarà conferito il Premio "Mauro Felli": è risultata vincitrice la dott.ssa Francesca Gonfia per la ricerca dal titolo:

*"Effetto inibitorio di bacilli di differente specie sull'attività biologica di un nitroarene (4-NQO) e di un agente alchilante (MNNG)."*

Il Presidente del Comitato Scientifico  
*prof. Sen. Gino Moncada Lo Giudice*

Il Presidente del Comitato Organizzatore  
*prof. Franco Cotana*

Il Direttore del CIRIAF  
*prof. Francesco Asdrubali*



## INDICE

### Inquinamento da Campi Elettromagnetici

Attività di ricerca sui meccanismi di interazione dei campi elettromagnetici con i tessuti biologici svolta dall'unità di Roma Tre del C.I.R.I.A.F. nel biennio 2005-06. <i>F. Bilotti, P. Di Rosa, G. Guattari, C. Sapia, A. Toscano, L. Vegni</i> .....	pag. 3
Monitoraggio dinamico dei campi elettromagnetici: validazione dei dati mediante rilievi statistici. <i>G. Barrera, S. Barbaro, A. Sansone Santamaria</i> .....	pag. 9
Indagine sperimentale sui campi elettrici e magnetici ELF in corrispondenza di scuole. <i>A. Conte, M. Balzano, F. Stragapede, M. Valle</i> .....	pag. 15

### Fonti Energetiche Rinnovabili

Tecnologie per il raffrescamento passivo degli edifici in clima mediterraneo. <i>A. Alagna</i> .....	pag. 21
Impianto Stand-Alone con accoppiamento di un campo fotovoltaico e un elettrolizzatore, integrato con celle a combustibile. <i>G. Crosa, M. Lubiano, F. Traverso, A. Trucco</i> .....	pag. 29
Reforming dell'Etanolo per l'alimentazione di celle a combustibile a carbonati fusi. <i>F. Rossi, M. Filippini, N. Corsi, M. Giuliobello, C. Amelio</i> .....	pag. 35
Utilizzazione energetica dell'olio vegetale puro. <i>M. Carlini, S. Castellucci</i> .....	pag. 41
Impiego dell'alga verde <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> per la produzione di idrogeno. <i>I. Montecarlo, N. Corsi, M. Giuliobello, F. Rossi, E. Cenci, F. Bistoni, A. Mencacci</i> .....	pag. 47
Il Life Cycle Assessment nella generazione elettrica da fonti rinnovabili: il caso delle "wind farm". <i>N. Cardinale, F. Ruggiero, G. Arpino</i> .....	pag. 53
Valorizzazione energetica degli scarti di potatura dei vigneti. <i>G. Cavalaglio, S. Cotana, M. Barbanera, D. Giraldi</i> .....	pag. 57
Progetto biomasse: Energia rinnovabile per le Aziende Agricole derivante dai Reflui Zootecnici (ERAARZ). <i>D. Giraldi, G. Cavalaglio, S. Massoli, S. Servili</i> .....	pag. 63

## **Clima e Cambiamenti Climatici**

Review on climate system feedbacks. <i>P. Bongioannini Cerlini</i> .....	pag. 71
Prototipo di un dispositivo per il controllo dell'albedo terrestre finalizzato al contenimento del riscaldamento globale. <i>F. Rossi, F. Cotana, M. Amantini</i> .....	pag. 77
Valutazione del clima di alcune città italiane mediante un indice di qualità ambientale. <i>A. Magrini, M. Albertini</i> .....	pag. 83
Studio dell'inquinamento da CO <sub>2</sub> nel centro urbano della città di Messina. <i>G. Cannistraro, L. Ponterio, D. Germanò</i> .....	pag. 91

## **Sviluppo Sostenibile e Qualità dell'Ambiente**

Integrazione degli strumenti di politica ambientale in un'area industriale. <i>M. Dell'Isola, E. Di Girolamo, A. Frattolillo, A. Forni, F. Frenquellucci, I. Olivetti</i> .....	pag. 97
Criteri per l'ottimizzazione del Piano Energetico Regionale con particolare riferimento alla riduzione delle emissioni di CO <sub>2</sub> . <i>P. Girdinio, E. Martino, A. Pini Prato</i> .....	pag. 107
Green Public Procurement: una spinta per la realizzazione di prodotti più puliti. Un caso applicativo nel settore legno-arredo. <i>R. Luciani, L. Andriola, A. Zamagni</i> .....	pag. 113

## **Inquinamento Acustico e da Vibrazioni**

Una panoramica sullo stato acustico del Paese: l'Osservatorio Nazionale sul Rumore. <i>S. Curcuruto, G. Bellabarba, R. Silvaggio, N. Tombolillo, M. Angelucci, C. Tibone</i> .....	pag. 123
Valutazione dell'inquinamento acustico in aree urbane in presenza di infrastrutture di trasporto. <i>M. Coppi, G. Moncada Lo Giudice, A. Venditti</i> .....	pag. 127
La valutazione della popolazione esposta al rumore: metodologie e applicazioni nella Regione Umbria. <i>F. Asdrubali, L. Frezzini, G. Marchetti, M. Angelucci</i> .....	pag. 133
Piano di risanamento acustico lungo la rete stradale in gestione a Veneto Strade SPA. <i>M. Strada, A. Lisiero, A. Alvaro</i> .....	pag. 141
Modellizzazione del rumore da traffico aeroportuale: l'aeroporto Cristoforo Colombo di Genova. <i>A. Baudà, D. Borelli, A. Marinoni, C. Schenone</i> .....	pag. 147

Pubblicazione in rete delle classificazioni acustiche dei comuni della Provincia di Roma. <i>P. Prignani, A. Venditti</i> ..... pag.	155
Il monitoraggio acustico della linea ferroviaria F.C.U.. <i>S. Ortica, C. Tosti</i> ..... pag.	161
L'ambiente sonoro nei parchi urbani e le reazioni dei fruitori. <i>G. Brambilla, L. Maffei, G. Zambon</i> ..... pag.	165
Confronto sistematico fra livelli acustici di lungo periodo in diversi contesti antropizzati. <i>A. Conte, M. Balzano</i> ..... pag.	169
Prezzi marginali immobiliari dei decibel differenziali di inquinamento da rumore. Un caso di studio. <i>D. E. Massimo, A. R. Castagnella, M. R. Giuffrè, M. Vescio</i> ..... pag.	175
Una metodologia per la misura delle prestazioni acustiche di pavimenti sopraelevati. <i>F. Asdrubali, F. D'Alessandro</i> ..... pag.	181

## **Qualità dell'Ambiente Costruito e Inquinamento Indoor**

Qualità dell'aria in ambienti scolastici: valutazione dei livelli di concentrazione di composti organici volatili (VOC) e di materiale particolato (PM <sub>10</sub> ). <i>A. Milone, D. Milone, S. Pitruzzella</i> ..... pag.	189
Analisi energetica, economica ed ambientale di edifici scolastici: verso l'attestazione energetica. <i>C. Carletti, F. Sciurpi</i> ..... pag.	197
Un approccio soggettivo adattativo per il comfort negli ambienti confinati basato su sistemi multiagente. <i>M. La Gennusa, C. Marino, A. Nucara, M. Pietrafesa, A. Pudano</i> ..... pag.	203
Recupero di una cavità naturale: indagine preliminare su aspetti microclimatici e illuminotecnici. Proposta di soluzioni ecocompatibili. <i>C. Buratti, P. Ricciardi, M. Vergoni</i> ..... pag.	209
Indici per la valutazione della qualità dell'aria negli ambienti civili confinati. <i>G. Nicoletti, G. Alitto, F. Anile</i> ..... pag.	217
Un modello statistico per la previsione dei livelli di concentrazione dei prodotti della combustione in ambienti domestici. <i>A. Milone, D. Milone, S. Pitruzzella</i> ..... pag.	223
Controllo termoigrometrico indoor negli spazi museali: analisi di un edificio in evoluzione climatica libera. <i>A. D'Orso, M. La Gennusa, G. Rizzo, G. Scaccianoce</i> ..... pag.	227
La valutazione economica delle prestazioni tecniche dei componenti dell'involucro edilizio: i serramenti. <i>L. Tronchin, K. Fabbri, I. Durvilli, V. Tarabusi</i> ..... pag.	233

Utilizzazione di sistemi di climatizzazione elio-assistiti in poli didattici universitari. <i>A. Franco, F. Fantozzi</i> .....	pag. 239
L'uso della termografia per una corretta diagnosi energetica mirata ad una riduzione dei consumi. <i>F. Fantozzi, S. Filippeschi, T. Santini</i> .....	pag. 245
Impianti di condizionamento per torri di controllo del traffico aereo. <i>R. de Lieto Vollaro, A. Vallati</i> .....	pag. 253

## **Efficienza dei Processi di Conversione Energetica**

Metodi di valutazione degli scambi termici tra suolo e aria nei condotti interrati. <i>G. Galli, F. Cipriani</i> .....	pag. 259
Verso la certificazione energetica degli edifici dell'Università degli Studi di Firenze. <i>G. Raffellini, L. Giannetti</i> .....	pag. 263
Studio di fattibilità tecnico economico di un impianto di condizionamento a pompa di calore geotermica e confronto con modello di calcolo attraverso il software di simulazione TRNSYS. <i>U. Desideri, L. Arcioni, D. Leonardi, F. Zepparelli, N. Sorbi, S. Cocchi</i> .....	pag. 269
Efficienza energetica degli scaldacqua elettrici ad accumulo per uso domestico: progetto di Norma Europea prEN 50440, metodi di prova e analisi dei risultati ottenuti nel Laboratorio Prove R&D della MTS Group. <i>U. Desideri, P. Lunghi, S. Proietti, A. Mancini, P. Terzoni</i> .....	pag. 275
Analisi termodinamica e simulazione di un impianto a ciclo combinato con sequestro della CO <sub>2</sub> . <i>S. Bracco, A. Trucco</i> .....	pag. 281
Sviluppo dell'utilizzo di tecniche ottiche per il monitoraggio di fenomeni termoacustici nelle turbine a gas. <i>R. Ninni, A. Ferrante</i> .....	pag. 287
Valutazioni energetiche ed economiche sulle varie tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno. <i>S. Arca, F. Cotana, F. Rossi, P. Di Profio, R. Germani, G. Savelli, M. Amantini</i> .....	pag. 293
Produzione di idrogeno mediante sonofolisi catalizzata: impiego di soluzioni solide di ossidi di Lantanio, Indio e Gallio. <i>F. Elisei, P. L. Gentili, F. Ortica, F. Rossi, M. Urbani</i> .....	pag. 301

## **Modelli di Simulazione Ambientale**

Metodologie di supporto ai processi decisionali finalizzati alla valutazione ambientale strategica di piani e progetti attraverso l'utilizzo di modelli di simulazione ambientale. <i>V. Grippaldi, A. R. Vernaci</i> .....	pag. 309
---	----------

Valutazione d'impatto ambientale per rilasci di effluenti radiochimici tramite analisi di tecniche e modelli di previsione. <i>R. Ippolito, C. Salierno</i> .....	pag. 315
--	----------

Studio di un indicatore globale per la stima della qualità ambientale nel centro urbano della città di Messina. <i>G. Cannistraro, L. Ponterio, M. Scampitelli</i> .....	pag. 321
---	----------

## **Inquinamento Atmosferico**

Un modello lagrangiano probabilistico per lo studio della diffusione di inquinanti gassosi in atmosfera. <i>R. Cipollone, E. Foglia</i> .....	pag. 329
--	----------

Definizione di un protocollo procedurale per l'individuazione delle fonti di emissione di PM <sub>10</sub> . <i>M. Milanese, D. Laforgia, G. Ciccarella, C. Mangia, I. Schipa, A. Tanzarella</i> .....	pag. 335
---	----------

Biodegradazione di particolato atmosferico ad opera di funghi: risultati di uno studio sperimentale nell'ottica delle strategie di protezione ambientale. <i>B. Moroni, L. Pitzurra</i> .....	pag. 343
--	----------

Caratteri morfochimici di polveri sottili in alcune realtà umbre: i contesti urbani di Perugia e Terni. <i>B. Moroni</i> .....	pag. 349
---	----------

Una valutazione della qualità dell'aria nella provincia di Chieti. <i>D. Ambrosini, L. Collalto, S. Sfarra, G. Galli</i> .....	pag. 353
---	----------

Misure e strategie nell'inquinamento urbano da riscaldamento. <i>G. Nicoletti, G. Alitto, F. Anile</i> .....	pag. 359
---	----------

## **Inquinamento da Sistemi di Trasporto e Mobilità Sostenibile**

Interazioni tra gli agenti e modelli a scelta discreta: una analisi della letteratura con una applicazione preliminare. <i>G. Paglione, R. Danielis, E. Marcucci, V. Gatta</i> .....	pag. 367
---	----------

Centri urbani di distribuzione delle merci e politiche del traffico: una valutazione empirica tramite le preferenze dichiarate. <i>E. Marcucci, R. Danielis, G. Paglione, V. Gatta</i> .....	pag. 373
---	----------

Stato di avanzamento delle attività per l'anno 2007 del sistema di trasporto innovativo Pipe\$Net. <i>F. Cotana, F. Rossi, M. Amantini, V. Brunori, A. Marri</i> .....	pag. 379
---	----------

L'impatto ambientale dei porti: una tassonomia metodologica e politica. <i>G. Marletto</i> .....	pag. 387
---	----------

## **Premio “Mauro Felli 2007”**

Effetto inibitorio di bacilli di differente specie sull’attività biologica di un nitroarene (4-NQO) e di un agente alchilante (MNNG).	
<i>F. Gonfia</i> .....	pag. 395
Albo d’Oro - Premio “Mauro Felli” .....	pag. 401

## **Indice Autori**

**SESSIONE**

**INQUINAMENTO  
DA CAMPI ELETTROMAGNETICI**



## **ATTIVITÀ DI RICERCA SUI MECCANISMI DI INTERAZIONE DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI CON I TESSUTI BIOLOGICI SVOLTA DALL'UNITÀ DI ROMA TRE DEL C.I.R.I.A.F. NEL BIENNIO 2005-06**

F. Bilotti, P. Di Rosa, G. Guattari, C. Sapia, A. Toscano, L. Vegni

C.I.R.I.A.F.

Dipartimento di Elettronica Applicata – Università degli Studi ROMA TRE

Via della Vasca Navale 84 – 00146 – Roma

Tel. 06.55177003 – Fax 06.55177026 – E-mail. vegni@uniroma3.it

### **SOMMARIO**

Questo contributo ha lo scopo di presentare l'attività svolta dall'unità C.I.R.I.A.F. di Roma Tre nel biennio 2005-2007 sui meccanismi di interazione dei campi elettromagnetici con i tessuti biologici. In particolare, vengono mostrati alcuni dei risultati sia di tipo teorico-progettuale sia di tipo sperimentale ottenuti nell'ambito di due temi di ricerca dal titolo "Ricerca sperimentale sulla caratterizzazione, il controllo e l'interazione cellulare dell'inquinamento elettromagnetico ambientale indoor di reti wireless esteso a tutta la filiera" e "Indagine sperimentale su fenomeni di cancerogenesi indotta da campi elettromagnetici su cellule bersaglio e materia vivente in ambiente controllato". Le due attività di ricerca sono state finanziate nell'ambito di un contratto di ricerca stipulato tra APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici) ed IPASS (Consorzio Ingegneria per l'Ambiente e lo Sviluppo Sostenibile).

### **INTRODUZIONE**

L'enorme sviluppo di sistemi, impianti ed apparati che generano ed immettono campi elettromagnetici nell'ambiente, quali i sistemi di telecomunicazione, tele-radiodiffusione, radar e telerilevamento, il crescente utilizzo delle tecnologie di riscaldamento elettromagnetico nelle applicazioni industriali, civili e mediche, lo sviluppo dei sistemi wireless per le trasmissioni dati e multimediali, l'aumento delle tensioni nei sistemi di trasporto dell'energia elettrica e l'estendersi della relativa rete di distribuzione concorrono a determinare nell'ambiente urbano e spesso anche in quello rurale livelli di campo elettromagnetico di vari ordini di grandezza superiori a quelli del fondo naturale.

Poiché l'insieme delle applicazioni suddette è utilizzato con continuità, campi elettromagnetici non trascurabili sono oggi presenti nell'ambiente in forma permanente. La presenza di tali livelli di campo costituisce una vera e propria forma di inquinamento ambientale (detto inquinamento elettromagnetico) da tenere presente nella progettazione dei sistemi e da controllare con attenzione in relazione a possibili conseguenze sull'uomo e/o sull'ecosistema.

Si è visto, in particolare, che dal punto di vista macroscopico il problema dell'interazione del campo elettromagnetico con i tessuti biologici può essere modellizzato come l'incidenza di un'onda elettromagnetica su un tessuto biologico, assimilabile quest'ultimo ad un mezzo con perdite circondato da aria. È possibile, cioè, ricondursi al tipico modello di comunicazione, dove il canale è costituito dall'ambiente in cui si propaga il campo elettromagnetico (aria, edifici, alberi...) ed i tessuti biologici rappresentano il ricevitore.

L'Unità di Roma Tre ha quindi provveduto alla individuazione e alla realizzazione di un prototipo

dimostrativo di un sistema di misura del campo elettromagnetico ed alla valutazione delle diverse condizioni sperimentali nelle quali ci si può trovare quando si vuole eseguire delle misure relative a sistemi wireless dotati di Access Point (AP). Lo sviluppo di queste attività ha permesso anche di individuare il tipo sorgente (cioè di Access Point) da utilizzare nel setup sperimentale.

### **PROGETTO DELLA CAMERA CLIMATICA TERMOSTATATA**

Nell'ambito del progetto si è realizzata una camera climatica caratterizzata dal fatto di non contenere elementi metallici che possano alterare l'uniformità del campo elettromagnetico.

A tale scopo la camera climatica (Figura 1) è stata realizzata in plexiglass (materiale trasparente e non metallico) di dimensioni 80x70x70 cm (altezza x lunghezza x profondità).

Tali dimensioni sono adeguate per contenere una tipica fiaschetta per colture cellulari da sottoporre a test di inquinamento elettromagnetico.

Il controllo delle grandezze che caratterizzano l'ambiente in cui è posta la fiaschetta viene effettuato in un box separato, di dimensioni molto più grandi, posto ad una certa distanza dalla camera climatica.

La fiaschetta da sottoporre a test deve essere mantenuta in condizioni ambientali particolari di temperatura, umidità e concentrazione di anidride carbonica.

La realizzazione proposta consente di regolare le suddette grandezze ambientali.

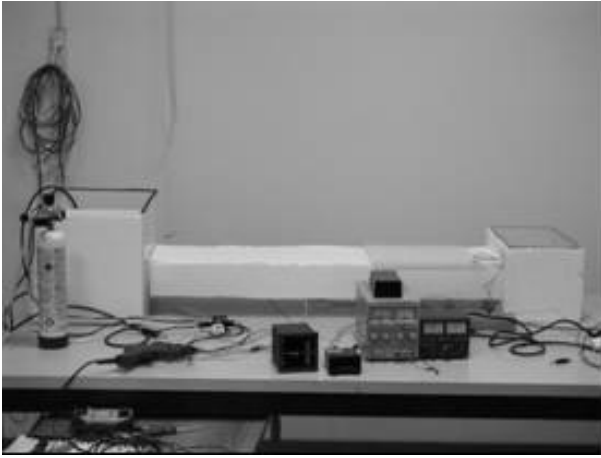


Figura 1: Visione d'insieme della camera climatica.

La camera climatica ed il box di controllo sono collegati tramite due tubi di plastica, uno di ingresso dotato di ventola aspirante e uno di uscita dotato di ventola aspirante (Figura 2).

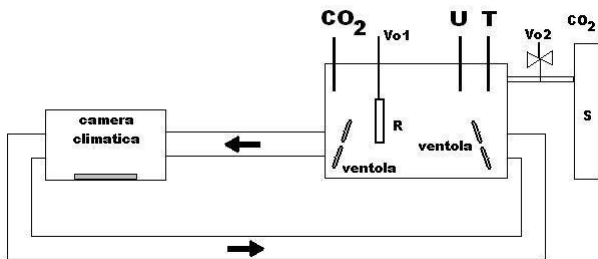


Figura 2: Camera climatica per regolare temperatura, umidità e CO2.

I componenti del sistema di controllo sono i seguenti:  
 CO2 = sensore per la misura dell'anidride carbonica CO2;  
 U = sensore per la misura dell'umidità relativa;  
 T = sensore per la misura della temperatura;  
 Ventola = ventilatore per forzare l'aria in entrata e in uscita;  
 R = elemento riscaldante;  
 S = serbatoio di CO2 ;  
 Vo2 = elettrovalvola per il controllo della portata della CO2

sono tutti allocati nel box di controllo. Pertanto, non ci sono oggetti metallici che possano portare disturbi alla camera climatica. Tale realizzazione, inoltre, garantisce la possibilità di avere un campo elettromagnetico inquinante che sia uniforme nello spazio occupato dalla fiaschetta.

Il controllo viene effettuato mediante un Personal Computer (PC) che comunica con i sensori e gli attuatori attraverso la porta parallela. Di seguito si riporta lo schema a blocchi funzionale (Figura 3).

Per la regolazione della concentrazione dell'anidride carbonica si è utilizzato il modulo descritto in Figura 4. Nello schema di Figura 3 si nota che il segnale proveniente dal sistema di controllo viene inviato ad un'unità di confronto insieme ad una tensione di riferimento corrispondente al valore di concentrazione desiderato. Il segnale di uscita dal blocco di confronto, attraverso un'interfaccia di potenza, comanda l'elettrovalvola EV-SMC di immissione dell'anidride carbonica contenuta in un serbatoio.

Per la regolazione della temperatura e dell'umidità si è utilizzata l'unità HT-3005 della LUTRON collegata ad un PC tramite un'interfaccia seriale RS232.

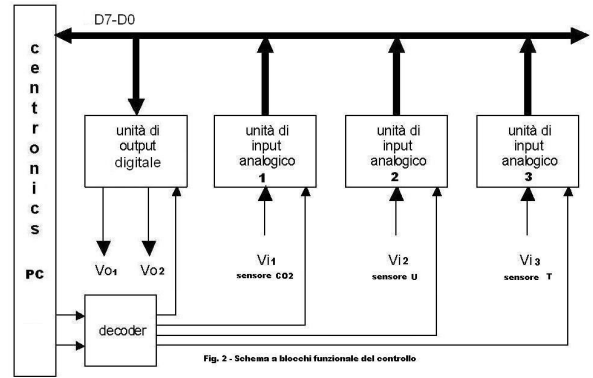


Fig. 2 - Schema a blocchi funzionale del controllo

Figura 3: Schema a blocchi funzionali del sistema di controllo.

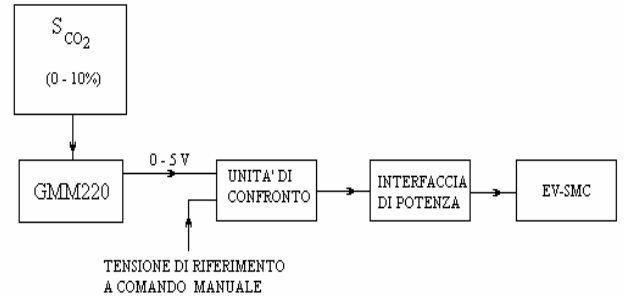


Figura 4: Schema a blocchi per la regolazione dell'anidride carbonica.

La risoluzione offerta dal dispositivo è di 0.1% per l'umidità e di 0.1°C per la temperatura. È opportuno precisare che il blocco sensori dello schema di Figura 4 utilizza due dispositivi indipendenti: un termistore per la misura della temperatura ed un sensore capacitivo per la misura dell'umidità.

Il PC acquisisce i dati relativi alla temperatura e all'umidità provenienti dall'HT-3005, quindi, attraverso un opportuno software li elabora e invia gli opportuni comandi ai blocchi interfaccia di potenza collegati alle unità di potenza riscaldante e umidificante, al fine di mantenere costanti i valori delle grandezza di interesse.

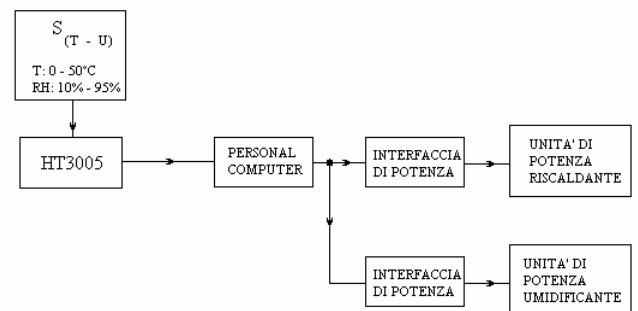


Figura 5: Schema a blocchi per la regolazione della temperatura e dell'umidità.

## CAMPAGNA DI MISURA DELL'INQUINAMENTO ELETTROMAGNETICO

### STRUMENTI DI MISURA UTILIZZATI

È ben noto che il sistema di misura affinché risulti essere un valido strumento per misure di Compatibilità Elettromagnetica

(EMC) deve essere implementabile direttamente “in situ” (in prossimità cioè dell’incubatore) e capace di convivere con il rumore generato dalle altre apparecchiature vicine in modo che sia possibile lavorare sull’hardware per tutta la fase di progettazione e di messa a punto. Viste le specifiche del problema e la complessità dell’ambiente elettromagnetico si è utilizzato l’analizzatore di spettro portatile FSH3 della Rohde&Schwarz che permette misure di campo elettromagnetico con le seguenti caratteristiche:

1. ampia larghezza di banda con frequenza di inizio banda dell’ordine di qualche kHz (< 10 kHz),
2. estrema accuratezza (risoluzione in frequenza non inferiore ai 10 Hz),
3. basso livello di rumore,
4. alta velocità di acquisizione,
5. facile portabilità,
6. interfacciabilità ad alta velocità (anche via TCP/IP) con strumenti di calcolo.

Per quanto riguarda il sistema di antenne si sono scelte le antenne (entrambe della Rohde&Schwarz):

- HFH2-Z6 per le misure nella banda 9 kHz ÷ 30 MHz ,
- HL562 per le misure nella banda 30 MHz ÷ 3 GHz .

Questo insieme di antenne ha garantito le seguenti quattro caratteristiche:

1. omnidirezionalità, in modo che con l’AP ad una distanza di oltre un metro possa ricevere il campo uniformemente da tutte le direzioni;
2. larghezza di banda, in modo da poter individuare segnali anche a frequenza molto distante da quella individuata per la sperimentazione;
3. alta sensibilità, in modo da non attenuare i segnali indesiderati provenienti da altre sorgenti poste in zona lontana rispetto all’AP;
4. connettibilità diretta al ricevitore, in modo da evitare l’uso di costosi amplificatori d’antenna e cavi speciali.

Si è poi utilizzato un software di gestione fornito a corredo delle apparecchiature avente le seguenti caratteristiche:

- abilita l’acquisizione in real-time e visualizza graficamente la traccia con una risoluzione verticale di 16 bit e una orizzontale di 4000 campioni e con un refresh da 10 a 100 s;
- permette l’azzeramento del massimo di fondo dell’ambiente (mediante comparazione fra la traccia acquisita e la traccia di rumore);
- permette la compensazione della traccia acquisita mediante i fattori di guadagno dell’antenna.

## MISURE SPERIMENTALI

Il prototipo dimostrativo descritto nella sezione precedente è stato già implementato dall’Unità di Campi Elettromagnetici del C.I.R.I.A.F. al fine di valutare sperimentalmente i valori di campo in prossimità dell’incubatore dove vengono coltivate le colture cellulari oggetto della ricerca. In particolare, sono state condotte insieme con l’Unità C.I.R.I.A.F. di Fisica Tecnica dell’Università di Perugia due campagne sperimentali di misure di campo elettromagnetico svoltesi rispettivamente il 12 dicembre 2005 ed il 23 gennaio 2007 presso il Dipartimento di Medicina Clinica e Sperimentale dell’Università di Perugia.

In Figura 6 si mostra la planimetria della stanza del Dipartimento di Medicina Clinica e Sperimentale dell’Università di Perugia dove sono state condotte le misure.

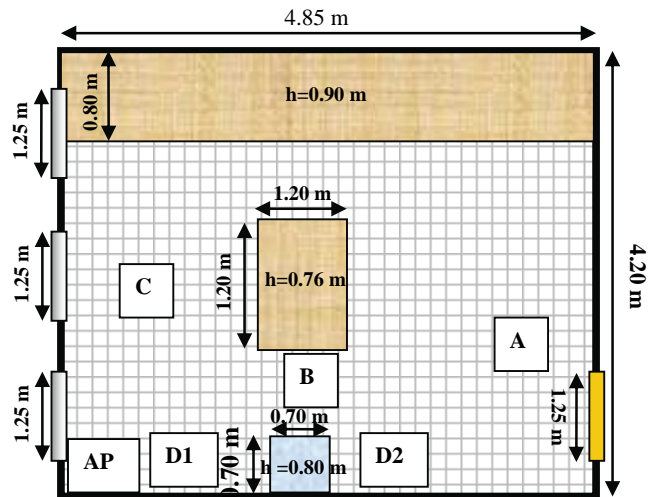


Figura 6: Planimetria della stanza del Dipartimento di Medicina Clinica e Sperimentale dell’Università di Perugia dove sono state condotte le misure.

Si è, innanzitutto, provveduto a misurare il campo elettromagnetico di fondo, in condizioni cioè di AP spento (Figure 7 e 8).

In Figura 7 viene mostrato l’andamento del modulo quadro del campo elettrico in prossimità dell’entrata della stanza dove è posto l’incubatore nell’intervallo di frequenze 75–125 MHz. Sono bene evidenti i contributi dovuti ai segnali radio in FM.

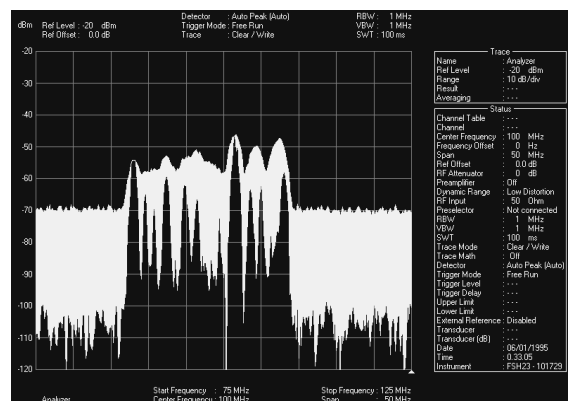


Figura 7: Andamento della potenza, nell’intervallo di frequenze 75–125 MHz, in prossimità dell’entrata della stanza dove è posto l’incubatore (A).

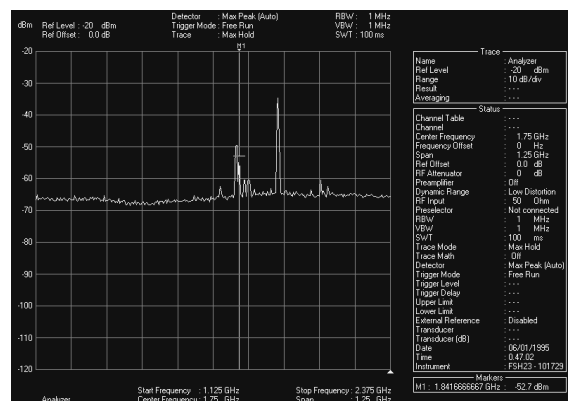


Figura 8: Andamento della potenza, nell’intervallo di frequenze 1125–2375 MHz, al centro della stanza dove è posto l’incubatore (B).

Nella Figura 8 viene mostrato l'andamento del modulo quadro del campo elettrico al centro della stanza dove è posto l'incubatore (B), nell'intervallo di frequenze 1125–2375 MHz. Sono bene evidenti i contributi dovuti alle portanti GSM a 1.8 GHz e UMTS a 1.9 GHz.

Si è poi passato a valutare il contributo al livello di potenza del campo elettromagnetico generato dalla comunicazione wireless. Per fare ciò si è innanzitutto stabilito un collegamento FTP tra due PC posti in luoghi diversi. Uno dei due PC era collocato nella stessa stanza dell'incubatore. Il flusso dati verso il PC posto nella stessa stanza dell'incubatore è stato quindi convogliato in modalità wireless attraverso un AP posto ad una distanza dal soffitto di circa 50 cm. In Figura 9 viene mostrato l'andamento del modulo quadro del campo elettrico ad una distanza di 2.2 m dall'AP ed ad un'altezza di 1.5 m dal pavimento.

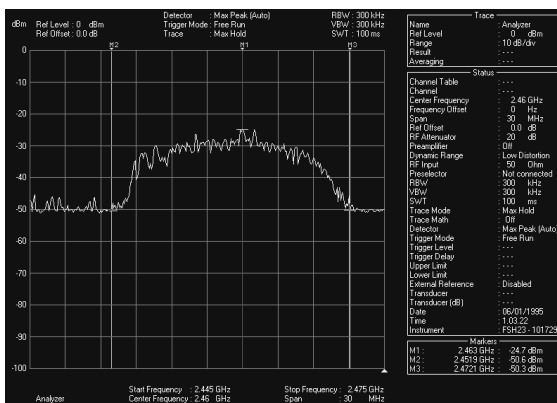


Figura 9: Andamento della potenza, nell'intervallo di frequenze 2445 MHz–2475 MHz, ad una distanza di 2.2 m dall'AP ed ad un'altezza di 1.5 m dal pavimento (C).

Le misure mostrate in Figura 10 e Figura 11 sono state effettuate in prossimità delle due pareti dell'incubatore poste di fronte all'AP (D1 e D2). In Figura 10 è mostrato l'andamento della potenza in prossimità del centro della parete dell'incubatore più vicina all'AP (D1) mentre in Figura 11 è mostrato l'andamento della potenza in prossimità del centro della parete dell'incubatore più lontana dall'AP (D2). Risulta evidente come i livelli di potenza misurati sono essenzialmente uguali. Ciò conferma che il materiale scelto per la realizzazione dell'incubatore è trasparente dal punto di vista elettromagnetico alle frequenze oggetto della sperimentazione.

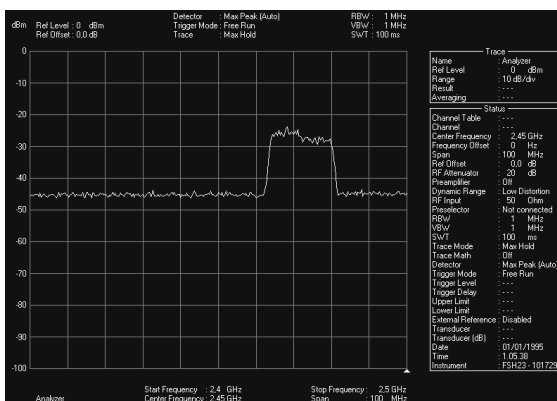


Figura 10: Andamento della potenza, nell'intervallo di frequenze 2.4–2.5 GHz, ad una distanza di 1.35 m dall'AP ed ad un'altezza di 1.5 m dal pavimento (D1).

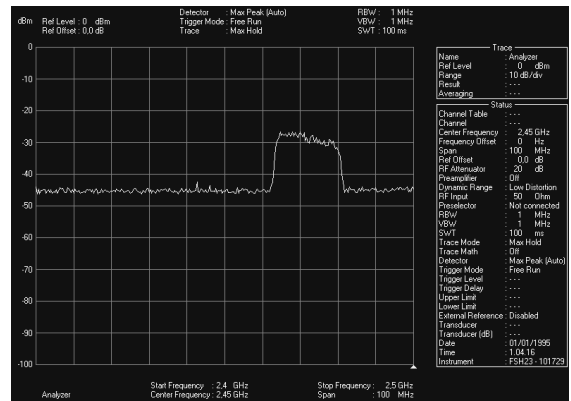


Figura 11: Andamento della potenza, nell'intervallo di frequenze 2.4–2.5 GHz, ad una distanza di 2.05 m dall'AP ed ad un'altezza di 1.5 m dal pavimento (D2).

## VALUTAZIONE NUMERICA DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO SU COLTURE DEL SISTEMA LINFOIDE

L'attività di ricerca ha previsto anche una campagna di simulazioni numeriche dei fenomeni di penetrazione e propagazione di campi elettromagnetici oscillanti sia a radiofrequenza (144 MHz) sia ad alta frequenza (2.44 GHz) su colture del sistema linfoide, in particolare su colture di cellule di timo.

In questa sezione si mostreranno quindi alcuni risultati numerici relativi alla valutazione dei fenomeni di propagazione di campi elettromagnetici su colture del sistema di cellule di timo.

Con il termine dosimetria si indica la determinazione della quantità ("dose") di potenza assorbita da un corpo biologico esposto a un campo elettromagnetico in diverse condizioni di esposizione. Tali condizioni di esposizione sono caratterizzate dalla densità di potenza, dalla polarizzazione e dalla frequenza dei campi elettromagnetici incidenti nonché dall'ambiente nel quale avviene l'esposizione.

La grandezza dosimetrica che meglio descrive lo scambio energetico che avviene tra radiazione elettromagnetica e materia vivente è la potenza assorbita per unità di massa, detta anche SAR (Specific Absorbition Rate).

La scelta del SAR come parametro fondamentale della dosimetria nasce dal suo uso, nelle normative internazionali di protezione dai campi elettromagnetici, quale parametro di base per stabilire il rischio derivante da una esposizione. A sua volta tale uso deriva dalla considerazione che il SAR, valutato localmente o mediato su tutto il corpo, sia una quantità adatta a confrontare gli effetti osservati sotto diverse condizioni di esposizione.

La determinazione della distribuzione di SAR può essere condotta per via numerica o per via sperimentale. La prima affronta l'analisi dell'assorbimento di potenza da un punto di vista puramente teorico, attraverso la valutazione del campo indotto nel corpo a partire da opportuni modelli di sorgenti di campo elettromagnetico e del corpo umano. La seconda, invece, misura il campo indotto nel corpo a partire da opportuni modelli dielettrici (detti fantocci) che rappresentano il corpo biologico.

La dosimetria numerica affronta il problema dell'assorbimento di potenza elettromagnetica da parte di un corpo biologico sotto un profilo puramente teorico.

Nella Figura 12 viene mostrata la distribuzione del SAR su due sezioni delle fiasche contenenti la coltura cellulare, poste

all'interno di un condensatore a piatti piani e paralleli alimentati da un campo elettromagnetico oscillante a 144 MHz. Nelle simulazioni la potenza di riferimento prodotta dal generatore di segnale è pari a 500 mW. È opportuno sottolineare come il SAR simulato all'interno delle fiasche sia comparabile con il livello massimo ( $1 \frac{W}{kg}$ ) consentito dalla

direttiva 2004/40/CE del Parlamento europeo e del Consiglio della Commissione Europea del 29 aprile 2004. Valore di riferimento che l'Italia dovrà recepire entro il 30 aprile 2008.

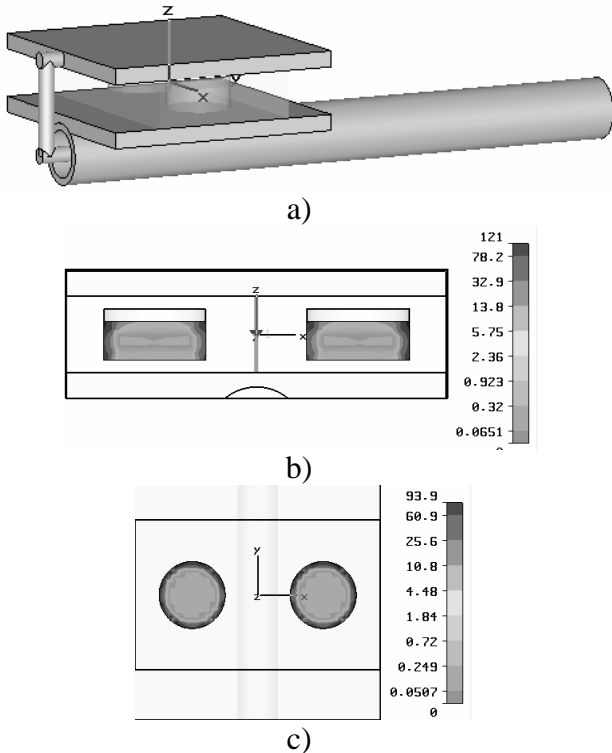


Figura 12: Analisi numerica della distribuzione di campo prodotta all'interno della fiasca inserita nel condensatore piano eccitato alla frequenza di 144 MHz. a) Schema geometrico di riferimento; b) distribuzione della potenza assorbita per unità di massa (direttamente collegabile al SAR) su una sezione verticale della fiasca; c) distribuzione della potenza assorbita per unità di massa su una sezione orizzontale della fiasca. La potenza di riferimento prodotta dal generatore è pari a 500 mW.

Nella Figura 13 viene mostrata la distribuzione del campo elettrico e magnetico all'interno dell'incubatore in presenza di un AP esterno che irradia una potenza pari a 19 dBm alla frequenza di 2.44 GHz.

Dal confronto degli andamenti mostrati in Figura 12 e Figura 13 appare evidente come a radiofrequenza la distribuzione del SAR all'interno delle colture cellulari è molto più disuniforme rispetto al caso ad alta frequenza. E' questo un risultato importante di cui bisogna tener conto, quando al termine del tempo di incubazione le cellule vengono prelevate, risospese nell'appropriato medium, contate al

microscopio emocitometrico e quindi analizzate in modo qualitativo e quantitativo.

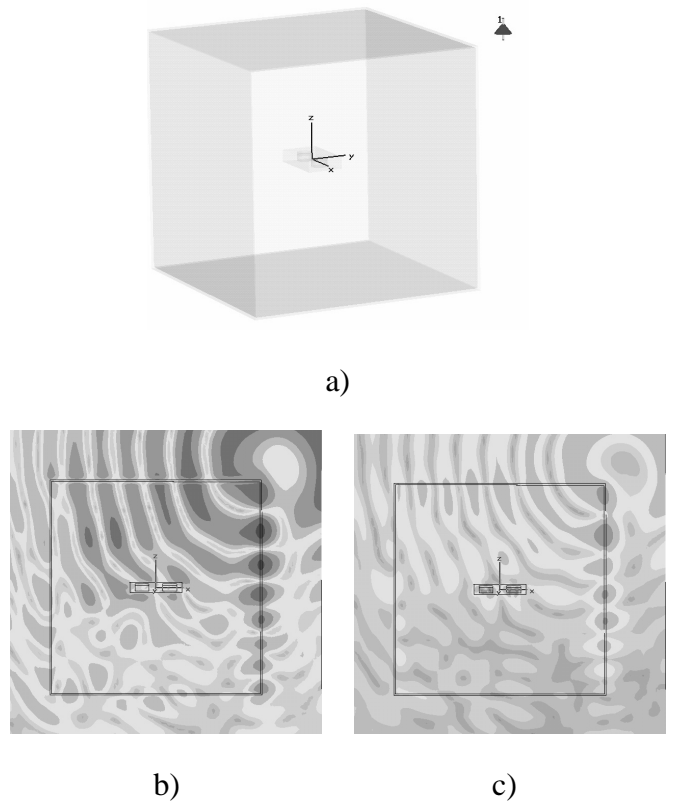


Figura 13: Analisi numerica della distribuzione di campo prodotta all'interno dell'incubatore in presenza di una sorgente dipolare a 2.44 GHz. a) Schema geometrico di riferimento; b) distribuzione del modulo del campo elettrico su una sezione verticale dell'incubatore; c) distribuzione del modulo del campo magnetico su una sezione verticale dell'incubatore.

## CONCLUSIONI

In questo contributo sono stati presentati alcuni dei risultati che l'Unità C.I.R.I.A.F. di ROMA TRE ha ottenuto nel biennio 2005-2006 nell'ambito di due temi di ricerca dal titolo "Ricerca sperimentale sulla caratterizzazione, il controllo e l'interazione cellulare dell'inquinamento elettromagnetico ambientale indoor di reti wireless esteso a tutta la filiera" e "Indagine sperimentale su fenomeni di cancerogenesi indotta da campi elettromagnetici su cellule bersaglio e materia vivente in ambiente controllato", rispettivamente. Le due attività di ricerca sono state finanziate nell'ambito di un contratto di ricerca stipulato tra APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici) ed IPASS (Consorzio Ingegneria per l'ambiente e lo Sviluppo Sostenibile).



## MONITORAGGIO DINAMICO DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI: VALIDAZIONE DEI DATI MEDIANTE RILIEVI STATICI

G. Barrera<sup>1</sup>, S. Barbaro<sup>1</sup>, A. Sansone Santamaria<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali, Università di Palermo, Viale delle Scienze  
90128 Palermo e-mail: gbarrera@dream.unipa.it ; sbarbaro@unipa.it

<sup>2</sup> Laboratorio di Fisica, Dipartimento Provinciale di Palermo dell'ARPA Sicilia, Via Nairobi, 4  
90100 Palermo e-mail: assiss@alice.it

### SOMMARIO

Nel lavoro proposto viene presentata una metodologia di validazione di dati di campo elettromagnetico rilevati in modalità dinamica, mediante misure in modalità statica rilevate in modo tradizionale. In particolare sono presentati i risultati di uno studio per la realizzazione di una infrastruttura automatizzata per il rilevamento di campi elettromagnetici.

La sperimentazione è stata effettuata con l'impiego di un mezzo mobile sul quale sono stati installati sia un'antenna GPS che un rilevatore di campi elettromagnetici, equipaggiati con il software per il trattamento dei dati acquisiti; sono state effettuate acquisizioni statiche (con intervalli di misura di sei minuti) e dinamiche.

Come zona di misura è stato scelto un multisito radiotelevisivo, sito a Monte Pellegrino che sovrasta la città di Palermo e risulta quindi una location ottimale per l'installazione di antenne di trasmissione sia su frequenze radiotelevisive che per telefonia cellulare.

Gli elaborati finali della sperimentazione consistono in carte tematiche, generate automaticamente, di campo elettromagnetico rilevato in modalità dinamica, confrontate con i valori puntuali di campo elettromagnetico rilevati in modalità statica. E' stata effettuata un'approfondita analisi statistica dei dati rilevati nelle due modalità, dalla quale risulta una buona correlazione tra le due serie di dati.

### 1. INTRODUZIONE

In un precedente lavoro [1], gli AA. hanno presentato un progetto di monitoraggio dinamico di campi elettromagnetici che ha portato alla realizzazione di una infrastruttura di misura, trasmissione, elaborazione e gestione dei dati rilevati.

In una prima fase della sperimentazione si è effettuato uno studio preparatorio avente come oggetto l'acquisizione combinata dei dati di posizione, espressi in coordinate nel formato UTM-WGS84 e dei valori di campo elettromagnetico in tre differenti aree test, ubicate sia in ambiente urbano che extraurbano; questo primo periodo si è reso necessario per l'organizzazione del sistema e la taratura delle attrezzature.

Al fine di connettere i sensori al tetto del mezzo mobile è stata appositamente progettata una barra di sostegno per le attrezzature, sfruttando un'asse di legno collegata rigidamente attraverso due piastre metalliche-magnetiche al tetto del mezzo mobile; in particolare una è stata posta ad un'estremità e l'altra in mezzzeria.

I dati di posizione e campo elettromagnetico sono stati calibrati ed acquisiti separatamente e sono stati postprocessati in funzione dell'istante di acquisizione all'interno di un foglio elettronico per le successive operazioni di elaborazione in ambiente GIS. In questa maniera è stato messo a punto un primo prototipo del sistema di rilevamento cinematico, che presenta però l'inconveniente di dovere disporre di due sistemi di rilevamento e di misura e di dovere ricorrere a numerose elaborazioni per l'allineamento temporale dei dati rilevati.

### 2. REALIZZAZIONE DELL'INFRASTRUTTURA MOBILE DI MISURA

L'infrastruttura mobile di misura è costituita da un mezzo

mobile sulla cui sommità sono stati collocati, mediante fissaggi di vario tipo, il sensore di campo elettrico e l'antenna GPS. Al fine di connettere i sensori al tetto del mezzo mobile è stata appositamente progettata una barra di sostegno per le attrezzature (figura 1).



Figura 1: Mezzo mobile di misura dei campi elettromagnetici

Per quanto riguarda le attrezzature sono stati impiegati un sistema GPS integrato, costituito da ricevitore Topcon GNSS Turbo G II e da un palmare HP iPaq, equipaggiato con il sistema operativo Windows CE e con software di gestione Meridiana CE; questa soluzione permette all'utilizzatore di sostituire il palmare con uno di più elevate prestazioni, mantenendo invariato il ricevitore GPS.

Il ricevitore utilizzato è in grado di rilevare il segnale proveniente sia da satelliti della costellazione GPS che da quella GLONASS; è un ricevitore a 50 canali, che può decodificare il segnale sulla portante L1 e la correzione WAAS/EGNOS. L'accuratezza posizionale dichiarata dalla casa produttrice è centimetrica in post elaborazione e sub-

metrica in DGPS. Al fine di migliorare la ricezione del segnale, e soprattutto per sfruttare anche i satelliti della costellazione GLONASS, si è ritenuto opportuno non utilizzare l'antenna integrata nel ricevitore GPS ma utilizzare, tramite l'apposito attacco esterno, una antenna Topcon del tipo Legant-A; questa ultima è stata fissata al tetto del mezzo mobile tramite un attacco magnetico.

La catena di misura dei campi elettromagnetici utilizzata per la sperimentazione è composta da uno strumento di acquisizione PMM 8053A collegato per mezzo di un cavo a fibra ottica e di un ripetitore ottico PMM OR-03 al sensore di campo elettrico PMM EP-330. Nelle tabelle 1 e 2 sono riportate le specifiche tecniche del sensore di campo elettrico e del ricevitore GPS.

Tabella 1: Scheda tecnica del sensore di campo elettrico PMM EP-330

<i>Campo di frequenza</i>	100 kHz - 3 GHz
<i>Portata</i>	0,3 - 300 V/m
<i>Sovraccarico</i>	> 600 V/m
<i>Dinamica</i>	> 60 dB
<i>Risoluzione</i>	0,01 V/m
<i>Sensibilità</i>	0,3 V/m
<i>Errore assoluto@ 50 MHz e 20 V/m</i>	± 0,8 dB
<i>Piattezza (10 - 300 MHz)</i>	± 0,5 dB
<i>Piattezza (3 MHz - 3 GHz)</i>	± 1,5 dB
<i>Isotropicità</i>	± 0,8 dB (tipico ± 0,5 dB)
<i>Retezione campo magnetico</i>	>20 dB
<i>Errore in temperatura 20°C ÷ 60°C</i>	±0,1 dB
<i>Errore in temperatura 0°C ÷ 20°C</i>	-0,05 dB/°C
<i>Errore in temperatura -20°C ÷ 0°C</i>	-0,15 dB/°C
<i>Calibrazione E:PROM</i>	interna
<i>Dimensioni</i>	317 mm lunghezza, 58 mm ø
<i>Peso</i>	100 g

Tabella 2: Scheda tecnica del ricevitore GPS

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA	
Numero di canali	30 L1 GPS/GLONASS
Segnali tracciati con antenna interna	L1 C/A e Fase, GPS, WAAS, EGNOS
Segnali tracciati con antenna esterna	L1 C/A e Fase, GPS/GLONASS, WAAS, EGNOS
<b>PRESTAZIONI DEL RICEVITORE</b>	
Precisione con antenna interna	1-2 m in post-elabor.
Precisione con antenna esterna	5 mm + 1,5 ppm in post-elabor. < 1 m in DGPS
Partenza da freddo	< 60 secondi
Partenza da caldo	< 10 secondi
Riacquisizione	< 1 secondo
<b>CARATTERISTICHE FISICHE</b>	
Dimensioni (cm)	8,7 x 0,2 x 15
Peso (gr)	500 batteria inclusa
Temperatura operativa	da -10°C a +40°C
<b>ANTENNA</b>	
Antenna incorporata	sì
Antenna esterna	Topcon PGA-5 (opzionale)
<b>ALIMENTAZIONE E CONSUMO</b>	
Alimentazione	1 batteria interna a litio ione
Durata batteria	fino a 9 ore
Consumo	1,2 Watt
<b>INPUT/OUTPUT</b>	
Porta di comunicazione	1 seriale
Porta per antenna esterna	connettore MCX
<b>MESSAGGI INPUT/OUTPUT</b>	
Input	RTCM versione 2.xx
Output	NMEA versione 2.xx
<b>PRESTAZIONI DEL CONTROLLER</b>	
Display	320x240 QVGA TFT a colori Touch Screen
Retroilluminazione	sì
Sistema operativo	MS Windows CE
Microprocessore	Intel PIA255 X-Scale
Velocità Processore	400 MHz
Memoria	64 Mb SRAM 32 Mb ROM
Espansione di memoria	tramite SD

### 3. MONITORAGGIO DINAMICO

I rilievi in modalità dinamica sono stati effettuati sul sito di Monte Pellegrino che sovrasta la città di Palermo e risulta una

location ottimale per l'installazione di antenne di trasmissione sia su frequenze radiotelevisive che per telefonia cellulare.

Il sito è caratterizzato quindi dalla contemporanea presenza di diverse sorgenti di campo elettromagnetico ad alta frequenza; il monitoraggio risulta di particolare interesse scientifico a causa della forza e stabilità dei segnali elettromagnetici presenti in situ. Si riporta in figura 2 il mezzo di misura impiegato per i rilevamenti. Si nota in posizione posteriore il sensore di campo elettrico fissato ad un'asse in legno ed in posizione centrale l'antenna GPS.



Figura 2: Mezzo di misura utilizzato per i rilievi su monte Pellegrino

Sulla zona di Montepellegrino si è scelto un percorso di misura che partisse da una posizione altimetricamente sottostante alle antenne e, proseguendo, arrivasse in corrispondenza dei siti di installazione, passando per una strada carrabile di libero transito, ancorché frequentata prevalentemente da lavoratori professionalmente esposti (militari, tecnici radiotelevisivi per manutenzione).

A seguito dei rilevamenti, sono state ottenute in postelaborazione le mappe cromatiche di campo elettrico, sovrapposte alle ortofoto digitali del territorio di interesse. Si riporta in figura 3 la mappa di campo elettrico costruita per punti, e in figura 4 la mappa ottenuta con le aree buffer, interpolando ed estendendo le misure effettuate ad un'area pari alla larghezza della sede stradale.

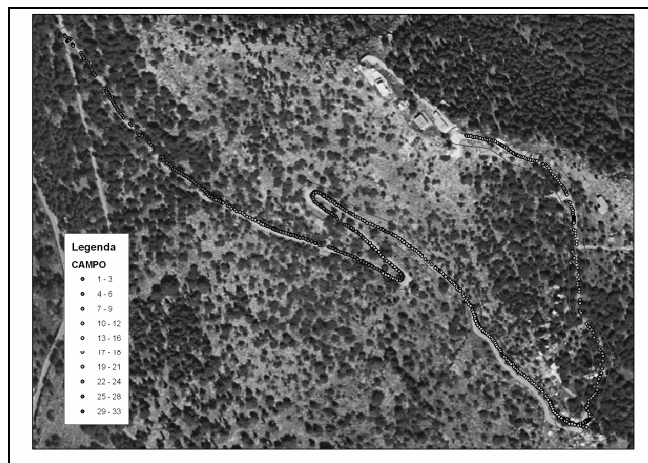


Figura 3: Mappa di campo elettrico realizzata sul sito di Monte Pellegrino (PA)

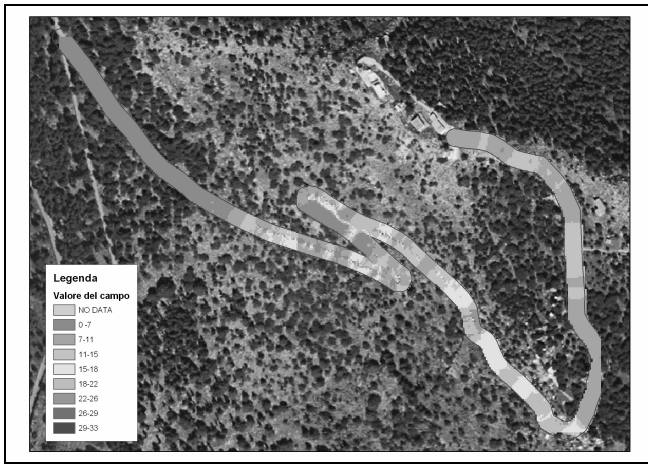


Figura 4: Mappa di campo elettrico con aree buffer – sito di Monte Pellegrino

Dall'analisi delle precedenti immagini si osserva che il valore di campo elettrico massimo rilevato è superiore a 40 V/m, che è un valore doppio rispetto al limite (20 V/m) imposto dalla normativa in vigore (D.P.C.M. 8/7/2003).

Quanto sopra conferma che il sito è di interesse scientifico, oltre che per la protezione della popolazione dall'esposizione ai campi elettromagnetici.

#### 4. MONITORAGGIO STATICO

Sono stati effettuati rilievi di campo elettrico in modalità statica, scegliendo una parte del percorso precedente, cerchiato in rosso in figura 5. Seguendo tale percorso sono stati individuati 38 punti di misura, sui quali era già stato effettuato il rilievo dinamico.

Le misure statiche sono state effettuate stando sul punto di misura per un intervallo di 6 minuti e ponendo lo strumento di misura su un treppiede in materiale non metallico, come prescrive la normativa vigente. Sono stati utilizzati contemporaneamente 3 strumenti di misura del tipo PMM 8053, descritto in precedenza. E' stata successivamente rilevata la posizione dei 38 punti di misura mediante una stazione GPS Topcon, descritta precedentemente, operante in modalità differenziale. Si riportano in figure 6 e 7 gli strumenti di misura in azione.

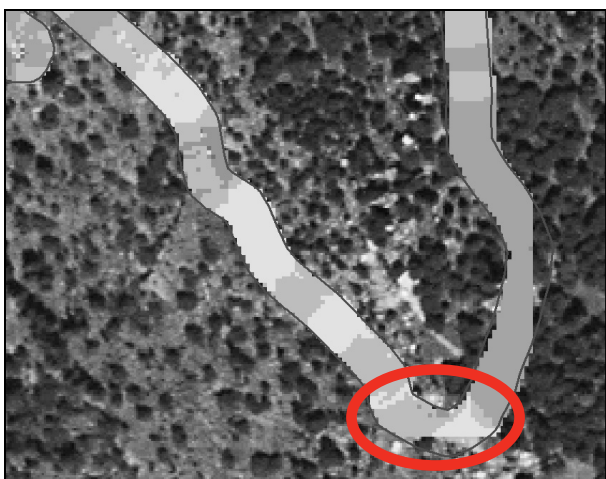


Figura 5: Percorso di misura in modalità statica



Figura 6: Misura statica di campo elettrico

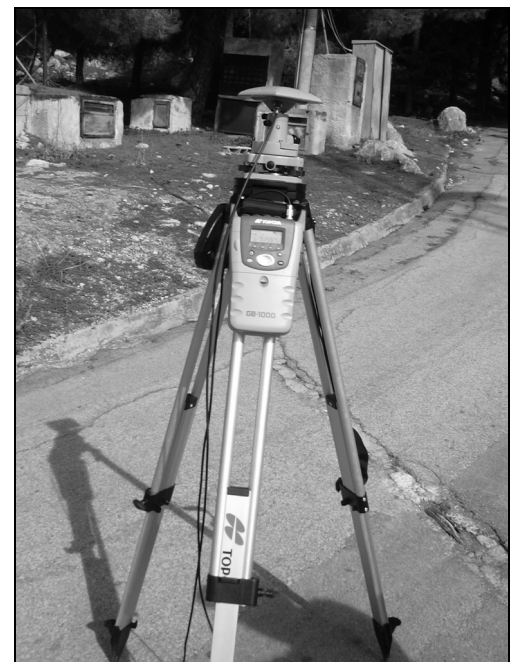


Figura 7: Stazione GPS, rilievo in modalità differenziale

Dai rilievi effettuati in modalità statica si ottiene una tabella di valori di campo elettrico relativi ai vari punti (tabella 3).

Tabella 3: Risultati delle misure di campo elettrico in modalità statica

Punto di misura	Campo elettrico (V/m)
1	17.3
2	18.9
3	24.11
4	19.3
5	21.36
6	25.44
7	23.06
8	18.72
9	17.17
10	20.42
11	22.49

12	22.48
13	22.44
14	22.85
15	21.2
16	17.61
17	17.14
18	17.61
19	18.45
20	18.8
21	16.69
22	19.72
23	21.83
24	27.5
25	29.06
26	38.15
27	39.14
28	27.98
29	39.71
30	41.83
31	21.23
32	18.11
33	23.4
34	30.22
35	31.01
36	29.47
37	23.37
38	22.07

18	17.61	4225121.641	355994.918	616.210
19	18.45	4225120.374	355995.922	614.427
20	18.8	4225120.889	355995.210	614.285
21	16.69	4225121.564	355993.437	614.198
22	19.72	4225121.899	355992.457	614.100
23	21.83	4225117.222	356019.206	617.109
24	27.5	4225122.371	355991.652	614.030
25	29.06	4225123.358	355989.918	613.854
26	38.15	4225123.784	355988.967	613.829
27	39.14	4225124.164	355988.106	613.733
28	27.98	4225124.586	355987.329	613.631
29	39.71	4225125.470	355986.419	613.508
30	41.83	4225125.812	355985.580	614.113
31	21.23	4225126.540	355985.100	613.491
32	18.11	4225117.581	356017.567	616.155
33	23.4	4225117.277	356016.386	615.422
34	30.22	4225116.646	356015.733	616.034
35	31.01	4225115.547	356014.903	616.430
36	29.47	4225125.950	356024.292	592.612
37	23.37	4225114.968	356013.961	616.403
38	22.07	4218815.170	355201.537	114.684

## 5. CONFRONTO TRA IL MONITORAGGIO STATICO E DINAMICO

Sulla base dei dati relativi ai rilievi statici e dinamici, sono state messe a confronto le misure effettuate con le due modalità; si riporta in tabella 5 il risultato di tale confronto.

Per confrontare i dati ottenuti con le due modalità, è utile ricorrere ad alcuni indici statistici sintetici relativi ai dati rilevati in modalità statica e dinamica, quali la media aritmetica, la deviazione standard, la varianza e la correlazione (tabella 6).

Tabella 5 – confronto tra monitoraggio statico e dinamico

Punto	Coordinata UTM Nord (m)	Coordinata UTM Est (m)	Altezza s.l.m.(m)	Campo elettrico dinamico (V/m)	Campo elettrico statico (V/m)
1	4225119,392	356020,270	616.411	18,91	17,3
2	4225115,678	356011,925	615.785	18,91	18,9
3	4225114,367	356011,249	616.336	18,96	24,11
4	4225115,536	356009,751	615.672	18,58	19,3
5	4225117,021	356008,726	614.657	17,48	21,36
6	4225116,068	356007,792	615.326	19,51	25,44
7	4225116,041	356006,794	615.259	22,43	23,06
8	4225115,233	356005,445	618.293	21,76	18,72
9	4225115,210	356004,464	618.001	22,18	17,17
10	4225115,922	356003,229	616.222	17,73	20,42
11	4225116,673	356001,772	616.232	23,56	22,49
12	4225118,644	356019,461	616.257	27,9	22,48
13	4225117,080	356002,527	619.397	28,1	22,44
14	4225117,895	356001,069	614.922	26,43	22,85
15	4225117,314	355998,731	617.801	30,13	21,2
16	4225119,235	355998,590	614.661	29,67	17,61
17	4225117,629	355997,860	614.699	25,76	17,14
18	4225121,641	355994,918	616.210	25,76	17,61
19	4225120,374	355995,922	614.427	17,23	18,45

Sulla base dei dati relativi al campo elettrico ed alla posizione geografica dei punti di misura, sono state poste in un'unica tabella le misure di campo elettrico, le relative coordinate Nord ed Est rilevate nel sistema UTM e l'altitudine sul livello del mare (tabella 4).

Tabella 4: Risultati finali dei rilievi statici di campo elettrico sul sito di Monte Pellegrino (PA)

Punto	Campo elettrico (V/m)	Coordinata UTM Nord (m)	Coordinata UTM Est (m)	Altezza s.l.m.(m)
1	17.3	4225119.392	356020.270	616.411
2	18.9	4225115.678	356011.925	615.785
3	24.11	4225114.367	356011.249	616.336
4	19.3	4225115.536	356009.751	615.672
5	21.36	4225117.021	356008.726	614.657
6	25.44	4225116.068	356007.792	615.326
7	23.06	4225116.041	356006.794	615.259
8	18.72	4225115.233	356005.445	618.293
9	17.17	4225115.210	356004.464	618.001
10	20.42	4225115.922	356003.229	616.222
11	22.49	4225116.673	356001.772	616.232
12	22.48	4225118.644	356019.461	616.257
13	22.44	4225117.080	356002.527	619.397
14	22.85	4225117.895	356001.069	614.922
15	21.2	4225117.314	355998.731	617.801
16	17.61	4225119.235	355998.590	614.661
17	17.14	4225117.629	355997.860	614.699

20	4225120,889	355995,210	614.285	17,48	18,8
21	4225121,564	355993,437	614.198	17,48	16,69
22	4225121,899	355992,457	614.100	13,57	19,72
23	4225117,222	356019,206	617.109	24,57	21,83
24	4225122,371	355991,652	614.030	27,17	27,5
25	4225123,358	355989,918	613.854	32,74	29,06
26	4225123,784	355988,967	613.829	30,39	38,15
27	4225124,164	355988,106	613.733	30,01	39,14
28	4225124,586	355987,329	613.631	30,01	27,98
29	4225125,470	355986,419	613.508	24,54	39,71
30	4225125,812	355985,580	614.113	23,07	41,83
31	4225126,540	355985,100	613.491	21,47	21,23
32	4225117,581	356017,567	616.155	24,13	18,11
33	4225117,277	356016,386	615.422	24,92	23,4
34	4225116,646	356015,733	616.034	25,11	30,22
35	4225115,547	356014,903	616.430	26,84	31,01
36	4225125,950	356024,292	592.612	26,28	29,47
37	4225114,968	356013,961	616.403	26,1	23,37
38	4218815,170	355201,537	114.684	26,12	22,07

Tabella 6 – Indici statistici di confronto tra i dati ottenuti con le due modalità di rilevamento

	Campo elettrico modalità dinamica	Campo elettrico modalità statica
MEDIA (V/m)	24.47	23.88
dev.standard (V/m)	6.28	6.74
varianza (V <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	39.47	45.44
Correlazione	0.90	

Al fine di interpretare correttamente i dati rilevati, bisogna premettere che gli unici dati ufficiali sono quelli rilevati in modalità statica che è ben codificata e riconosciuta a livello legislativo; inoltre le misure statiche sono effettuate secondo la norma CEI 211-6. Dunque nell'interpretazione dei risultati si riterranno valide le misure statiche, pur con le incertezze di misura relative allo strumento.

Dall'analisi complessiva degli indici statistici dei dati relativi al confronto tra le due modalità di misura, si ricava che la differenza tra le medie dei valori rilevati in modalità statica (23.88 V/m) e dinamica (24.47 V/m) è di modesta entità. La differenza in percentuale risulta, infatti, pari a:

$$\text{Diff} (\%) = \frac{(24.47 - 23.88)}{24.47} * 100 = 2.4\% \quad (1)$$

Analizzando gli indici statistici di dispersione dalla media, si ottiene che sia la deviazione standard che la varianza delle misure statiche sono superiori rispetto agli stessi indici delle misure dinamiche. Dunque le misure statiche presentano una maggiore variazione rispetto alla media, mentre quelle dinamiche sono nel complesso più concentrate intorno alla media.

Per confrontare le due serie di dati, relative alle due modalità di misura, è utile ricorrere all'indice statistico "coefficiente di correlazione", il cui valore si trova in tabella

6. Il coefficiente di correlazione indica quantitativamente il legame di dipendenza tra le due serie di dati; il valore assunto in questo caso è pari a 0.9, che indica una forte correlazione tra le due serie di dati.

## 6. CONCLUSIONI E SVILUPPI

I risultati ottenuti dall'integrazione tra i due strumenti di misura, cioè GPS palmare e sensore di campo elettromagnetico, confermano quali siano le zone interessate da alti valori di campo elettrico in tutti i siti di interesse. Tali zone sono state delimitate su cartografia, come risulta nei paragrafi precedenti.

Per integrare i due strumenti in un'unica infrastruttura di misura, è stato allestito un veicolo mobile attrezzato con la strumentazione di monitoraggio. L'aspetto più importante di questa fase della sperimentazione è rappresentato dalla realizzazione esecutiva del supporto hardware e software di elaborazione dei dati. Un possibile sviluppo della sperimentazione è rappresentato dalla realizzazione di un sistema automatico più complesso per la trasmissione dei dati.

Le campagne di misura sono state pianificate sia in funzione dei percorsi effettuati che degli intervalli orari in cui effettuare i rilevamenti. La scelta delle zone da monitorare è ricaduta sui percorsi normalmente interessati da traffico veicolare e/o pedonale, in cui erano prevedibili alti valori di campo elettrico in base all'ubicazione delle antenne di trasmissione presenti nelle vicinanze.

L'esito dei primi rilevamenti condotti in modalità dinamica su Monte Pellegrino porta alla constatazione che, all'approssimarsi delle antenne di trasmissione poste sulla cima del monte, il valore di campo elettrico rilevato è spesso superiore al limite normativo pari a 6 V/m per luoghi adibiti a permanenze superiori a 4 ore giornaliere. In alcuni punti, indicati nelle mappe cromatiche con gradazioni di colore tendenti al rosso, tali valori superano anche il valore di 20 V/m che rappresenta il valore limite assoluto da non superare per qualsiasi tempo di esposizione.

Durante la terza fase della sperimentazione è stato approfondito lo studio dell'influenza delle parti metalliche del veicolo sulle misure di campo elettrico mediante misure di confronto condotte, nelle stesse condizioni, in presenza ed in assenza del veicolo. Tali misure di confronto sono state effettuate soprattutto in presenza di segnali molto stabili, di valore elevato ed a frequenze medio-alte come quelli generati da antenne di trasmissione radiotelevisive e di telefonia cellulare installate in alcune aree urbane ed extraurbane della Sicilia.

In particolare l'attenzione è stata focalizzata sul multisito radiotelevisivo posto su Monte Pellegrino, che risponde perfettamente alle esigenze espresse in precedenza. Infatti i segnali che vi si trovano sono di valore elevato a causa del numero e della potenza delle antenne di trasmissione installate; tali segnali sono stabili perché di tipo radiotelevisivo.

Sono state effettuate quindi misure di confronto dinamiche e statiche, al fine di validare i rilevamenti ottenuti in modalità dinamica con misure statiche, realizzate secondo la normativa vigente e la norma CEI 211-6.

Dall'analisi di tali misure di confronto emerge che le misure dinamiche seguono abbastanza fedelmente l'andamento di quelle statiche; le differenze riscontrate sono dovute all'interferenza del mezzo mobile ed alla velocità dello stesso, che, seppur ridotta, influenza le misure.

L'analisi statistica dei dati porta inoltre a considerare che la modalità dinamica sovrastima il campo elettrico per valori superiori al limite normativo pari a 20 V/m, mentre c'è una modesta sottostima per valori inferiori a tale limite. Queste considerazioni indicano che per valori elevati di campo elettrico è più grande l'interferenza dovuta alla presenza del veicolo e alla velocità dello stesso.

E' stato messo a punto un sistema innovativo ed avanzato per il monitoraggio dinamico dei campi elettromagnetici, con l'ausilio di tecniche GPS e GIS. Mediante questo sistema è possibile produrre mappe cromatiche georiferite di inquinamento elettromagnetico relative a vaste zone di territorio.

I vantaggi rispetto al monitoraggio statico sono evidenti: il metodo proposto permette di monitorare efficacemente vaste zone di territorio in breve tempo e con un risparmio economico notevole per l'ente preposto al monitoraggio, cioè l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente.

Questa tipologia innovativa di monitoraggio è utile comunque come valutazione preventiva per la scelta dei punti critici da monitorare con metodi tradizionali, che prevedono di fermarsi nel sito di interesse per un intervallo di tempo pari a 6 minuti ed effettuare misure più approfondite in banda stretta nel caso di multisiti, in cui è necessario distinguere le varie sorgenti inquinanti che, sommate, danno il campo totale.

I possibili sviluppi prevedono l'utilizzo di un mezzo mobile dotato di palo telescopico verticale, mediante il quale sarà possibile rilevare i valori di campo sul territorio a diverse altezze in modo da distinguere la distribuzione spaziale di inquinamento elettromagnetico presente.

Un ulteriore possibile sviluppo della sperimentazione è rappresentato dalla realizzazione di un sistema automatico per la trasmissione dei dati, per cui occorrerà mettere a punto un sistema complesso. Mediante tale sistema, la generazione di mappe cromatiche di campo elettromagnetici avverrà in tempo reale, grazie all'invio di segnali ad una postazione fissa in grado di riceverli ed elaborarli opportunamente. In tal caso, si

dovrà porre l'attenzione sulla frequenza dei segnali emessi, in modo che non confliggano con il sensore di campo inficiando così la validità delle misure rilevate.

Infine, sarà determinata la precisione conseguibile con i ricevitori GPS, attraverso la realizzazione di percorsi inseriti all'interno della viabilità urbana e passanti per punti di coordinate note, in modo da poter determinare la precisione e l'affidabilità delle misure di posizione, insieme a quelle di campo elettromagnetico.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. G. Barrera, S. Barbaro, A. Sansone Santamaria, Monitoraggio dinamico dei campi elettromagnetici nelle aree urbane – problematiche e casi studio, Atti Convegno "Ciriaf 2006".
2. Deshpande A. 2004. Modulated Signal Interference in GPS Acquisition. ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, 21-24 Sept., Long Beach, California USA.
3. D. Trincherò, R. Tascone "L'esposizione della popolazione in ambiente urbano" Atti del Convegno "CEMS 2000 Campi elettromagnetici e salute" Torino 2 Marzo 2000, pp. 73-82.
4. A. Ammoscato, G. Dardanelli, A. Scianna, B. Villa, S. Barbaro, G. Barrera, A. Sansone Santamaria, V. Mazzola, "Tecniche gps per il monitoraggio di campi elettromagnetici", Palermo, convegno SIFET 2005
5. G. Dardanelli, Tecniche GPS-GIS per il monitoraggio di campi elettromagnetici, Tesi di dottorato di ricerca, Università degli Studi di Napoli Parthenope, 2005.
6. G. Barrera, Monitoraggio dinamico dei campi elettromagnetici mediante utilizzo di tecniche GPS – GIS, Tesi di dottorato di ricerca, Dipartimento di ricerche Energetiche ed Ambientali, Università degli studi di Palermo, 2007.

## INDAGINE SPERIMENTALE SUI CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI ELF IN CORRISPONDENZA DI SCUOLE

Alessandro Conte<sup>1</sup>, Michele Balzano<sup>1</sup>, Franca Stragapede<sup>1</sup>, Massimo Valle<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Provincia di Genova – Ufficio Rumore

L.go Cattanei 3, 16147 Genova

<sup>2</sup>ARPAL Dipartimento Provinciale di Genova – Settore Campi Elettromagnetici

Via Bombrini 8, 16149 Genova

conte.a@provincia.genova.it, massimo.valle@arpal.org

### SOMMARIO

Nell'ambito della collaborazione istituzionale ARPAL e Provincia di Genova nel biennio 2003 – 2004 hanno realizzato uno studio sui livelli di campo elettrico e magnetico in corrispondenza di asili nido e scuole materne, elementari e medie.

Dopo un'analisi di dati e censimenti pregressi, sono stati selezionati nove siti in cui si sono rilevati i livelli di campo elettrico e di campo magnetico. Successivamente, per due siti ritenuti particolarmente significativi, sono stati acquisiti i dati sulle correnti elettriche di elettrodotto presenti al momento delle misure e sono stati utilizzati in uno schema di calcolo basato sugli algoritmi consigliati nella norma CEI 211 – 4. Il confronto fra i valori di campo calcolati ed i corrispondenti valori misurati ha consentito di valutare la concreta applicabilità dello schema di calcolo a situazioni reali, spesso caratterizzate da dati di partenza approssimati od incompleti soprattutto per le inevitabili difficoltà di reperimento e determinazione delle informazioni necessarie alle elaborazioni.

### INTRODUZIONE

Le competenze normative in materia di inquinamento elettromagnetico attribuite alla Provincia comprendono le funzioni di controllo e vigilanza per gli elettrodotti con tensione inferiore a 150 kV, funzioni che si esplicano in collaborazione con ARPAL.

Nell'ambito di questa collaborazione, e a fini conoscitivi e preventivi, nel biennio 2003 – 2004 è stato realizzato lo studio [1], di seguito sintetizzato, sui livelli di campo elettrico e magnetico in corrispondenza di asili nido e scuole materne, elementari e medie.

L'obiettivo dello studio è duplice: da un lato si è voluto compiere un'indagine strumentale per verificare i livelli di campo in corrispondenza degli edifici scolastici più esposti, dall'altro si è studiata la possibilità di individuare un metodo pratico di stima, sufficientemente affidabile, dei livelli di campo applicabile anche come screening preliminare a successive indagini sul campo mirate ed approfondite.

### CAMPI ELETTRICO E MAGNETICO: LIMITI DI LEGGE

La legge quadro sull'inquinamento elettromagnetico (L. 36/2001) individua definizioni e ambiti di competenza degli Enti ed i successivi decreti attuativi impongono i limiti che non devono essere superati nelle diverse condizioni di esposizione.

Il D.P.C.M. 08.07.03 fissa i limiti di esposizione a campi a 50 Hz per la popolazione in 5 kV/m per il campo elettrico e 100  $\mu$ T per il campo magnetico (per i luoghi adibiti a permanenze non inferiori a 4 ore sono definiti anche i valori di

attenzione 5 kV/m e 10  $\mu$ T e gli obiettivi di qualità 5 kV/m e 3  $\mu$ T).

### ANALISI DEI DATI PREGRESSI

La L.R. (Liguria) 21 giugno 1999 n. 18 fra i compiti assegnati all'ARPAL individua la realizzazione e l'aggiornamento del catasto delle sorgenti fisse di inquinamento elettromagnetico, ivi compresi gli elettrodotti.

L'analisi dei dati presenti nel catasto, relativamente alle reti di elettrodotti a 132 kV, 220 kV e 380 kV, ha prodotto, fra l'altro, la statistica riportata in Tabella 1, focalizzata sul parametro intensità di corrente media annua.

Nel 2001 il Ministero dell'Ambiente ha formulato la richiesta alle Regioni ed alle ARPA di effettuare un censimento delle tratte di linee elettriche ad alta tensione ubicate in prossimità di asili nido, scuole e parchi gioco. ARPAL ha espletato l'attività di censimento mettendo in luce la presenza di scuole a distanze inferiori a 150 metri rispetto a elettrodotti a media ed alta tensione (132 kV).

Tabella 1. Distribuzione linee elettrodotti per intensità di corrente media annua.

I media A	380 kV	220 kV	132 kV
< 100	0%	25%	16%
100 - 200	0%	50%	58%
200 - 300	0%	25%	21%
300 - 400	0%	0%	5%
400 - 500	100%	0%	0%

Tabella 2. Numero di asili e scuole a meno di 150 m da elettrodotti in provincia di Genova.

	Dist. (m)	nido	mat.	elem.	med.
<b>132</b> <b>kV</b>	< 50	3	7	7	6
	50 ÷ 100	1	6	6	2
	100 ÷ 150	3	14	6	4
	<i>Tot.</i>	7	27	19	12
<b>220</b> <b>kV</b>	< 50	-	-	-	-
	50 ÷ 100	-	2	1	-
	100 ÷ 150	-	1	-	-
	<i>Tot.</i>	-	3	1	-
<b>MT</b>	< 50	1	2	3	4
	50 ÷ 100	3	4	3	2
	100 ÷ 150	2	3	4	3
	<i>Tot.</i>	6	9	10	9

Nella Tabella 2 si riporta una sintesi statistica dei risultati del censimento effettuato nel 2001 nel territorio provinciale di Genova.

## METODOLOGIA

### Le misure

Allo scopo di effettuare il monitoraggio ARPAL ha messo a punto un protocollo di misura che prevede l'esecuzione di misure prevalentemente all'interno degli edifici scolastici, con misure estese alle aree esterne adibite a permanenze prolungate.

Le procedure operative sono di seguito sintetizzate:

1. Serie di misure spot (pochi minuti) estese a tutte le aree della scuola più vicine all'elettrodotto, al fine di acquisire una mappatura della distribuzione spaziale dei livelli di campo.
2. Misura prolungata (24 h) nel punto di campo maggiore, al fine di acquisire una time history relativa alla distribuzione temporale giornaliera dei livelli di campo.
3. Acquisizione (ove disponibili) dei dati relativi alle correnti presenti al momento delle misure, nonché della corrente media annua e massima per il successivo utilizzo del modello di calcolo onde valutarne l'applicabilità a casi reali e per estrapolare i valori di esposizione massima (campo magnetico).

Le misure di campo di cui ai punti 1 e 2 sono state condotte utilizzando il misuratore di campo PMM 8053 dotato di sonda isotropa per campo elettrico e magnetico ELF EHP-50 A.

Tutte le misure sono state condotte in condizioni di campo imperturbato.

### Le stime teoriche

Allo scopo di effettuare stime teoriche, mediante simulazioni al computer, dei livelli di campo elettrico e magnetico in varie configurazioni di elettrodotto si sono adoperati gli algoritmi consigliati nella norma CEI 211 - 4 "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche".

Il metodo schematizza la linea elettrica come insieme di conduttori di lunghezza infinita e paralleli fra loro e rispetto al terreno (piano e di estensione infinita).

La norma specifica che in sezioni corrispondenti alla parte centrale o al vertice della catenaria il calcolo fornisce valori con buona accuratezza, inoltre anche in prossimità del punto di sospensione dei conduttori l'approssimazione rimane inferiore al 10%.

In relazione alla corretta simulazione di casi reali, dei due schemi di calcolo utilizzati il più critico risulta quello per il campo elettrico; rispetto a quest'ultimo, infatti, il campo magnetico è in genere meno perturbato dall'ambiente e quindi le approssimazioni introdotte nel relativo algoritmo di simulazione risultano meno pesanti.

L'algoritmo di calcolo del campo elettrico si fonda sul metodo delle cariche equivalenti semplificate (ovvero concentrate nel centro dei conduttori e con densità lineare di carica costante) e sul principio delle cariche immagini (ovvero cariche di segno opposto e speculari, rispetto al terreno ipotizzato quale piano equipotenziale a potenziale nullo, alle cariche che generano effettivamente il campo). La norma sottolinea che il modello è valido in assenza di oggetti conduttori (campo imperturbato) quali, ad esempio, edifici, alberi, recinzioni.

La presenza di oggetti conduttori può perturbare il campo elettrico in modo anche molto significativo, causando innalzamenti al di sopra di essi e riduzioni in prossimità del suolo circostante; inoltre gli edifici schermano i propri ambienti interni.

L'algoritmo di calcolo del campo magnetico si basa sulla legge di Biot - Savart che fornisce, in ogni punto dello spazio, il valore del campo generato da una corrente elettrica di intensità determinata percorrente un conduttore rettilineo. Il modello, di buona applicabilità nella maggior parte dei casi reali, ha il limite di non consentire la valutazione dell'effetto schermante dei materiali ferromagnetici.

## LO STUDIO

### Livelli di campo misurati

Sulla scorta dei dati raccolti durante la fase di censimento si è provveduto ad estrarre un campione di nove edifici scolastici genovesi (quattro fra asili nido e scuole materne A1÷A4; tre scuole elementari: E1÷E3; due scuole medie: M1÷M2), scelti fra i più esposti, da sottoporre a monitoraggio strumentale.

In Fig. 1 si riporta, come esempio, il grafico del rilievo di campo magnetico ( $\mu T$ ) su 24 ore e relativo alla scuola E2.

Nella Tabella 3 si riporta, invece, una sintesi dei dati rilevati per entrambi i campi elettrico e magnetico in tutte le scuole interessate dal monitoraggio.

Per ciascuna scuola sono riportati i valori del campo elettrico (V/m) e del campo magnetico ( $\mu T$ ), in quest'ultimo caso intesi come: valore "spot" più significativo e mediana, minimo e massimo rilevati con la misura su 24 ore.

Si riportano, inoltre, i valori minimo e massimo dell'intero campione per ciascun parametro considerato.

Dai dati riportati nella Tab. 3 si può notare che esistono ampi margini fra i valori massimi rilevati ed i valori di attenzione previsti dalla vigente normativa.

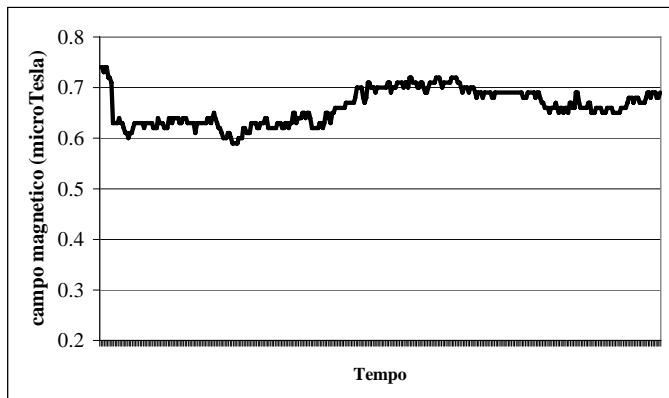


Figura 1. Misura su 24 ore del livello di campo magnetico in corrispondenza dell'edificio scolastico E2.

Tabella 3. Sintesi dei livelli di campo elettrico e magnetico rilevati per le scuole "campione".

	Campo elettrico (V/m)	Campo magnetico ( $\mu\text{T}$ )			
		Spot	mediana 24h	min 24 h	max 24 h
A1	32	0.13	0.08	0.04	0.17
A2	10	0.05	0.05	0.03	0.07
A3	14	0.09	0.09	0.07	0.14
A4	12	0.52	0.56	0.5	0.7
E1	10	0.05	0.05	0.03	0.07
E2	2.4	0.7	0.66	0.6	0.75
E3	35	0.1	0.09	0.07	0.15
M1	12	0.04	0.04	0.03	0.07
M2	15	0.14	0.17	0.13	0.2
Max	35	0.7	0.66	0.6	0.75
min	2.4	0.04	0.04	0.03	0.07

### Stime teoriche dei livelli di campo

Lo scopo è verificare l'applicabilità a casi reali dei calcoli previsionali dei campi elettrico e, soprattutto, magnetico effettuati ispirandosi alla norma CEI 211 - 4.

Spesso i dati di partenza non sono sufficienti ad iniziare il calcolo: anche nei casi in cui i dati risultano più completi mancano frequentemente utili informazioni che rendono necessario introdurre qualche valore ipotetico, accanto a quelli "reali" forniti dal Gestore, per poter procedere alla simulazione dei valori dei campi elettrico e magnetico.

Sono stati selezionati, fra i siti oggetto di monitoraggio, due casi di studio (corrispondenti alla scuola E2, ubicata in Via Rigola, e all'asilo nido A4 in Via S. Marino) per i quali sono state effettuate le simulazioni e quindi il confronto dei valori simulati con quelli misurati.

Per quanto riguarda il valore della corrente è stata utilizzata la mediana calcolata a partire dai dati forniti dal Gestore, per i giorni corrispondenti a quelli delle misure, allo scopo di confrontare il dato simulato del campo magnetico ( $B$ ) con il valore misurato della mediana di  $B$  su 24 ore.

I dati geometrici sulla forma dei tralicci e sulla distanza fra questi e i siti dei rilievi (recettori) sono stati approssimativamente stimati nel corso di sopralluoghi.

Allo scopo di tenere conto dell'indeterminazione sulle informazioni circa la geometria dei tralicci e le distanze recettore – sorgente si è così proceduto:

- ⇒ sono state simulate, per entrambi i casi E2 e A4, due distinte configurazioni di traliccio (una di dimensioni complessivamente – geometria e altezza della testa – minime e una massime);
- ⇒ sono state considerate distanze e altezze da terra del recettore comprese fra un minimo ed un massimo intorno ai valori stimati.

In tal modo si sono ottenuti degli intervalli di valori simulati da confrontare con gli omologhi misurati. I risultati del test sul modello sono riassunti nelle Tabelle 4 e 5 (le configurazioni 1 e 2 per E2 sono diverse dalle omonime per A4).

I valori simulati per il campo magnetico  $B$  risultano complessivamente, anche in considerazione delle incertezze nei dati di partenza, in discreto accordo in termini di ordine di grandezza con i corrispondenti valori misurati. Valutando la variabilità dell'errore relativo in funzione delle diverse ipotesi di configurazione, nel caso E2 oscilla fra -9% e 51%, mentre nel caso A4 l'accordo risulta migliore con un errore relativo massimo pari a -25%.

E' auspicabile, e ragionevole, attendersi che con una maggiore precisione nei dati di input al modello si ottengano risultati più soddisfacenti.

Per quanto riguarda il campo elettrico  $E$ , invece, i valori calcolati sono maggiori rispetto ai valori misurati per un fattore da circa 10 a circa 100. Questa discrepanza è ampiamente giustificabile dal fatto che le misure sono state effettuate all'interno degli edifici scolastici: in questi casi è normale che il campo elettrico misurato sia almeno un ordine di grandezza minore di quello calcolato, perché il modello di calcolo non tiene conto delle proprietà schermanti delle strutture solide, trascurabili in genere per il campo magnetico ma evidenti per il campo elettrico (la discontinuità di costante dielettrica e conducibilità tra aria e strutture in muratura/alberi/etc. fa sì che le linee di forza del campo elettrico tendano ad aggirare tali ostacoli, riducendo sensibilmente il campo all'interno od in prossimità degli stessi).

Tabella 4. Confronto fra valori misurati e calcolati per il caso di studio E2.

	Mis.	Sim. conf. 1	Sim. conf. 2
$E$ (V/m)	2.4	153 ÷ 185	130 ÷ 160
$B$ ( $\mu\text{T}$ )	0.66	0.6 ÷ 1.0	0.5 ÷ 0.9

Tabella 5. Confronto fra valori misurati e calcolati per il caso di studio A4.

	Mis.	Sim. conf. 1	Sim. conf. 2
$E$ (V/m)	12	72 ÷ 80	85 ÷ 93
$B$ ( $\mu\text{T}$ )	0.56	0.42 ÷ 0.51	0.46 ÷ 0.56

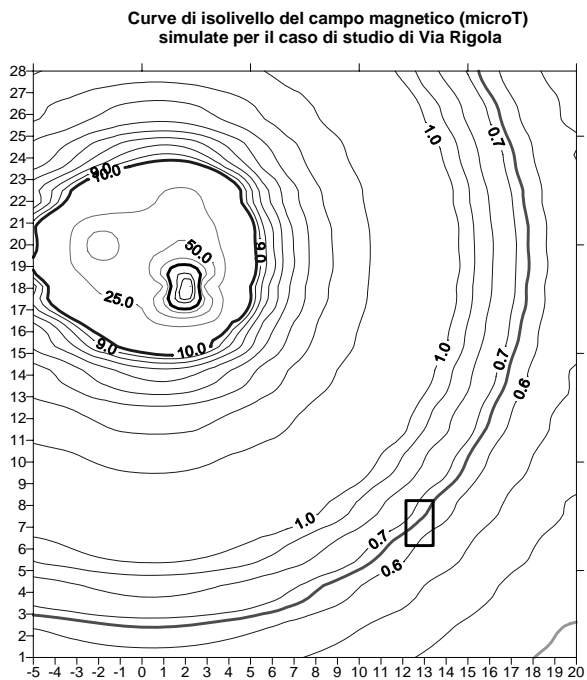


Figura 2. Curve di isolivello del campo magnetico in una sezione verticale (caso di studio E2).

Nella Figura 2, come caso di esempio, sono riportati i risultati delle simulazioni del campo magnetico per E2 (nella configurazione 2) sotto forma di curve di isolivello per il campo magnetico (in una sezione verticale perpendicolare alla linea elettrica e passante per l'asse del traliccio).

La sezione entro cui risulta compreso il sito di misura (considerate le indeterminazioni di circa 1 m in orizzontale e 2 m in verticale) è bordata in nero (rettangolino in basso a destra): la curva di isolivello corrispondente al valore misurato (0,66  $\mu\text{T}$ ) attraversa tale rettangolo, in altri termini il valore simulato risulta in discreto accordo con quanto rilevato strumentalmente.

La testa del traliccio, ovviamente, è ubicata in corrispondenza delle curve corrispondenti ai valori più alti (l'asse del traliccio, non rappresentato, incrocia l'asse delle ascisse al valore zero). L'andamento delle curve mostra che in prossimità dei conduttori il campo magnetico decresce molto rapidamente allontanandosi da essi, mentre a distanze maggiori il decremento è più lento.

## CONCLUSIONI

Le misure di campo elettrico e magnetico effettuate hanno fornito livelli largamente inferiori ai valori limite di legge per tutti i casi considerati; in particolare si osserva che il livello di campo magnetico è sempre risultato inferiore a 1  $\mu\text{T}$ .

L'applicazione del modello a due casi di studio non può costituire, ovviamente, una validazione ma, soltanto, una prova dell'applicabilità del modello stesso a situazioni reali, quindi in presenza anche delle inevitabili difficoltà di reperimento e determinazione dei dati necessari alle elaborazioni.

Una effettiva validazione, infatti, richiederebbe l'esame di un più ampio numero di casi e dati di input molto più precisi di quanto è stato possibile ottenere per questo studio. Alcuni test preliminari degli algoritmi, qui non riportati, hanno mostrato la criticità di alcuni parametri per il calcolo dei campi (fra questi parametri critici vi sono, oltre alle tensioni ed alle correnti, i dati geometrici sulla testa e l'altezza del traliccio).

I risultati delle simulazioni hanno comunque fornito indicazioni incoraggianti in merito a future applicazioni per stimare il campo magnetico con la fiducia di ottenere, anche in presenza di approssimazioni di partenza abbastanza rozze, stime del campo entro un fattore 10 rispetto al valore effettivamente misurabile. Il metodo, perciò, può risultare un utile mezzo per effettuare stime grossolane in base a cui individuare casi da sottoporre a successive indagini strumentali.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano, per il loro contributo alla realizzazione della campagna di misure, Renato Luongo, Massimo Oggianu e Christian Zerega di ARPAL – Servizi Territoriali – Settore Campi Elettromagnetici.

## NOMENCLATURA

<i>B</i>	campo magnetico ( $\mu\text{T}$ )
<i>E</i>	campo elettrico (V/m)

## BIBLIOGRAFIA

1. Provincia di Genova e ARPAL, Indagine sui livelli di campo elettrico e magnetico generati da elettrodotti ad alta tensione presso le scuole in provincia di Genova, Provincia di Genova, Genova, 2004.

**SESSIONE**

**FONTI ENERGETICHE  
RINNOVABILI**



## TECNOLOGIE PER IL RAFFRESCAMENTO PASSIVO DEGLI EDIFICI IN CLIMA MEDITERRANEO

Antonino Alagna

DPCE – Dipartimento Progetto e Costruzione Edilizia – Università degli Studi di Palermo

### SOMMARIO

Il raffrescamento passivo, in una condizione climatica classificata subtropicale, o temperata calda, deve essere perseguito in tutto l'arco delle 24 ore, ossia deve essere sia diurno che notturno, anche se con differente efficacia. Il sistema di raffrescamento che si intende adottare va studiato nei suoi comportamenti in due situazioni particolari, sotto soleggiamento di giorno ed in assenza di soleggiamento di notte. E' chiaro che in ambedue i casi si fa riferimento agli effetti della ventilazione naturale, e ove necessario artificiale.

L'ipotesi fa parte di una ricerca progettuale sulla individuazione di un sistema di stratificazioni, o di filtri, al fine di potere regolare e controllare i flussi energetici tra interno ed esterno, ipotizzando un sistema più complesso oltre quello delle normali schermature solari e soprattutto in corrispondenza delle chiusure trasparenti.

Il sistema si fonda sulla presenza di uno spazio di climatizzazione interposto tra ambiente esterno e ambiente interno, quale zona di mediazione con funzioni di ammortizzatore tra condizioni climatiche esterne e condizioni ambientali desiderate all'interno. La regolazione e il controllo del complessivo sistema è affidato all'utente che potrà in ragione delle sue specifiche esigenze, in tempi e modi diversi, regolare i vari filtri.

### PREMESSA

All'interno della grande questione della sostenibilità, la filosofia tecnica della *casa passiva* continua ad affermarsi grazie all'importanza dei risultati raggiunti e delle prospettive di ulteriori sviluppi. Tuttavia le realizzazioni riguardano sostanzialmente aree geografiche in cui la prevalenza climatica è quella del clima freddo.

In questi ultimi anni, con riferimento a insediamenti urbani posti nel Sud dell'Europa e del Mediterraneo in genere, si è verificato un vorticoso aumento nel consumo energia elettrica a causa del crescente numero di impianti per il condizionamento estivo. Per cui la questione del raffrescamento passivo in periodo estivo è sempre più urgente specie in merito a quegli edifici che ricadono in località densamente urbanizzate e soggette a forte radiazione solare.

Al riguardo è già stato osservato come le modalità tecniche della *passivhaus*, del Centro Europa, non sono direttamente applicabili alle zone climatiche del Sud dell'Europa e del Mediterraneo, ma occorre piuttosto reimpostare gli assetti tecnologici del complessivo *sistema edificio-impianto* in vista di una *passivhaus mediterranea*. In questo senso sono già stati avviati programmi di ricerca da parte di organismi qualificati per la redazione di linee guida di progettazione ed esecuzione, nonché l'elaborazione di software dedicati (PHPP, Passive House Planning Package).

### 1. STRATEGIE PER IL RAFFRESCAMENTO PASSIVO DEGLI EDIFICI IN CLIMA MEDITERRANEO

Contrariamente alla comune opinione, il raffrescamento passivo, in una condizione climatica classificata subtropicale, o temperata calda, deve essere perseguito in tutto l'arco delle

24 ore, ossia deve essere sia diurno che notturno, anche se con differente efficacia. Ciò perché l'efficacia dei sistemi passivi di condizionamento richiede tempi più lunghi dei sistemi attivi. Il sistema di raffrescamento che si intende adottare va osservato in tutto l'arco delle 24 ore nei suoi comportamenti ed in due situazioni particolari, sotto soleggiamento di giorno ed in assenza di soleggiamento di notte.

In ambedue i casi si intende fare riferimento agli effetti di ombreggiamento e di ventilazione naturale che si potrebbero ottenere attraverso un secondo sistema di chiusura di tipo leggero e parallelo al sistema di chiusura principale dell'edificio. Il riferimento è ad edifici multipiani la cui esposizione li rende particolarmente soggetti al surriscaldamento estivo, cui in genere si fa fronte attraverso impianti di climatizzazione artificiale.

Nell'ipotesi formulata il secondo sistema di chiusura dovrebbe andare oltre le prestazioni delle usuali schermature solari. In particolare ed in periodo estivo:

- di giorno, il sistema dovrebbe essere chiuso e regolato secondo apertura e inclinazione, per fornire ombreggiamento e ventilazione, senza pregiudicare il necessario flusso luminoso
- di notte, il sistema dovrebbe essere richiuso per non bloccare la ventilazione trasversale degli ambienti e il naturale raffreddamento delle pareti nel contatto con l'aria fresca della notte.

La stessa cosa dovrebbe avvenire con eventuali sistemi di chiusura secondaria posti in copertura, nel senso che questi dovrebbero, se adeguatamente disposti, consentire il raffrescamento e il deposito della tipica umidità notturna, che, per evaporazione durante il giorno, pure contribuirà al raffrescamento.

In vista di una migliore specifica tecnica futura, al momento risultano determinanti i seguenti obiettivi di progetto.

*Raffrescamento passivo diurno:* attraverso la riflessione

della radiazione solare, l'ombreggiamento e la ventilazione; in questo bisognerebbe ricercare opportune combinazioni di schermature solari in facciata e camini solari in copertura, capaci di ridurre il surriscaldamento della parete attraverso una zona intermedia di ventilazione tra ambiente esterno e chiusura dell'involucro edilizio (la parete esterna).

*Raffrescamento passivo notturno:* attraverso forme di ventilazione naturale, e artificiale ove necessario. Ai fini del raffrescamento notturno, occorrono dispositivi tecnici capaci di incrementare sia i flussi di ventilazione orizzontali in direzione nord-sud, sia i moti convettivi all'interno, anche attraverso sistemi che posti sulla facciata sud facciano da tiraggio attraverso gli ambienti in direzione nord-sud, ossia dalla facciata fredda alla facciata calda per raffreddarla.

Al fine di perseguire gli obiettivi di cui sopra, ed anche in funzione di esperienze al riguardo già acquisite, risulta fondamentale la creazione di uno "*spazio di climatizzazione*" che svolga un ruolo, di mediazione tra interno ed esterno, del tipo passivo-attivo. In merito allo spazio di climatizzazione vi sono due funzioni da evidenziare:

- quella di massa d'aria con funzioni di isolamento termico;
- quella di spazio utile per indurre la ventilazione attraverso i necessari moti ascensionali e quindi il raffrescamento.

Un'altra questione importante da evidenziare è il valore fisico di tale spazio climatico di mediazione, che, in quanto massa d'aria, dovrebbe assorbire una buona parte del carico termico, che in sua assenza sarebbe destinato alla massa della parete, e consentire poi attraverso forme di ventilazione la dispersione.

Inoltre è ancora importante il dimensionamento dello spazio climatico perché a parità di potere radiante esterno una massa d'aria più grande si riscalderebbe di meno. Al momento l'ipotesi formulata è prevalentemente rivolta alla condizione climatica estiva, ma bisognerà anche esaminare le conseguenze invernali ai fini del possibile riscaldamento passivo.

## **2. LO SPAZIO DI CLIMATIZZAZIONE: UNA POSSIBILE RISORSA**

Quanto detto porta a formulare uno spazio di climatizzazione delimitato dalla parete dell'edificio da un lato, e da una seconda chiusura dall'altro. Uno spazio di climatizzazione naturale con funzioni di mediazione dei flussi luminosi, termici, igrometrici e acustici, inteso come sistema di chiusura secondario rispetto a quello primario che costituisce il sistema di chiusura tipico degli edifici. Una specie di seconda pelle che si apre e si chiude in maniera intelligente al fine di realizzare gli apporti energetici più consoni ed in maniera passiva.

Un'altra questione da osservare è la modalità di attuazione di apertura, chiusura e regolazione del sistema, perché, se non si vuole andare incontro a costosi sistemi automatizzati (sistemi intelligenti), occorre che sia l'azione umana a movimentare il sistema, proprio come avviene per le tradizionali finestre e soprattutto in funzione delle necessità dell'utenza.

Ciò che quindi si viene a creare è uno spessore d'aria che possiamo chiamare "spazio di climatizzazione" (uno spazio cuscinetto), molto simile a quello presente nei sistemi di chiusura detti "a doppia pelle", che deve fare da intermediario tra interno ed esterno; e che quindi deve svolgere un ruolo altamente tecnologico proprio sotto il profilo passivo.

Il ruolo e le capacità di climatizzazione passiva di un tale spazio derivano dalla sua dimensione e conformazione, ma in

eguale misura dalla qualità dei due sistemi di chiusura che lo delimitano, all'esterno la schermatura solare, all'interno la parete. La creazione consapevole di un tale spazio climatico di regolazione e controllo delle variabili ambientali, in senso passivo, comporta la necessità dello studio analitico di:

- studio dei movimenti d'aria possibili tra interno ed esterno;
- studio della possibile ventilazione in senso orizzontale nello spazio climatico;
- studio della possibile ventilazione in senso verticale nello spazio climatico;
- studio del sistema di chiusura esterna in condizione invernale ed estiva;
- studio dello stato termico e igrometrico, regolazione e controllo;
- studio dello stato acustico, regolazione e controllo;
- studio del flusso luminoso, regolazione e controllo.

È evidente come in una tale ipotesi il sistema di chiusura secondaria (schermatura), distaccato dall'involucro edilizio primario, assume il ruolo di una seconda pelle con prestazioni variabili di regolazione che vanno dalla totale chiusura alla totale apertura del sistema.

Il principio fisico cui si intende fare riferimento, è quello già sperimentato nel caso delle facciate ventilate, ma anche nei sistemi detti "a doppia pelle" in cui, in condizioni di clima temperato-caldo, attraverso l'ombreggiamento e la ventilazione, si cerca di evitare il surriscaldamento dell'involucro edilizio intendendo con questo la struttura, la massa muraria, gli infissi e la copertura.

La creazione di uno spazio di climatizzazione attraverso la schermatura alla radiazione solare estiva e la ventilazione indotta dovrebbero riguardare anche le coperture. Il sistema secondario, nel caso di coperture piane potrebbe essere opportunamente realizzato con pannelli fotovoltaici o collettori solari. Inoltre, se opportunamente distaccato dal calpestio attraverso apposita struttura avrebbe anche la finalità di realizzare uno spazio di climatizzazione orizzontale, che essendo privo di ostacoli dovrebbe favorire i movimenti d'aria in direzione da nord verso sud, sia di giorno che di notte e rendere fruibile la copertura stessa.

## **3. FRONTI DI APPLICAZIONE DELLO SPAZIO DI CLIMATIZZAZIONE**

Il sistema di chiusura secondario, posto sull'intero fronte, verrebbe a costituire come una seconda pelle e dovrebbe riguardare tutta l'estensione del fronte sud e del fronte ovest, considerato che l'irraggiamento sul fronte est (levante) è in genere debole anche in piena estate. L'irraggiamento più forte in estate si ha sui fronti sud ed in particolare ovest, poiché il tramonto avviene molto tardi e la forza radiante permane alta sino alla totale scomparsa del sole.

Affinché la schermatura abbia effetto deve essere sufficientemente staccata dalla parete dell'edificio, il che comporta l'impegno di un certo spazio e della sua possibile fruibilità. In particolare un sistema continuo di mensole a livello di solaio, in pratica balconi continui, potrebbe costituirsi, oltre che come elemento di forte ombreggiamento, come struttura portante del sistema di schermatura e consentire inoltre uno spazio aperto, ma coperto (semichiuso) di cui potere fruire in clima estivo.

Resta da valutare il ruolo delle mensole, che se in calcestruzzo, caso frequente negli edifici multipiani esistenti, sezionano lo spazio in senso orizzontale, impedendo di fatto i moti ascensionali di aria calda dal basso verso l'alto, che

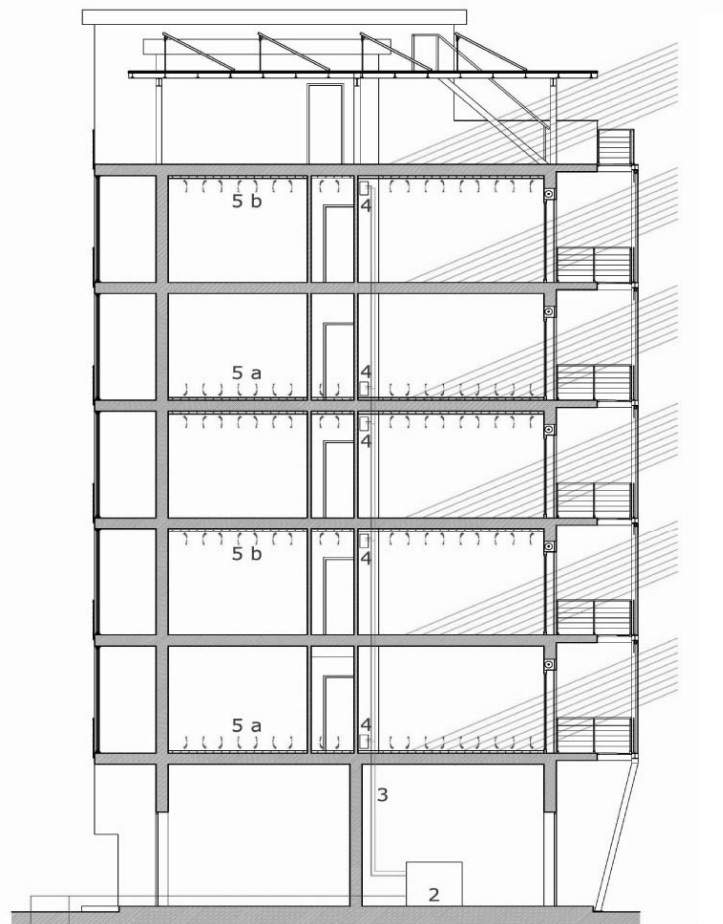
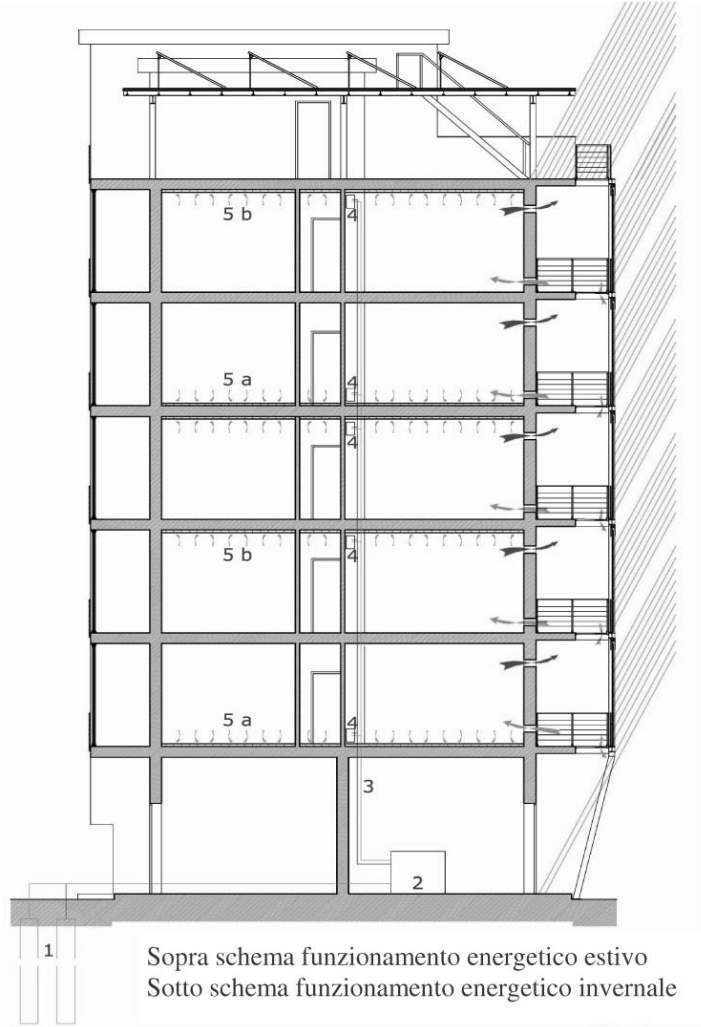
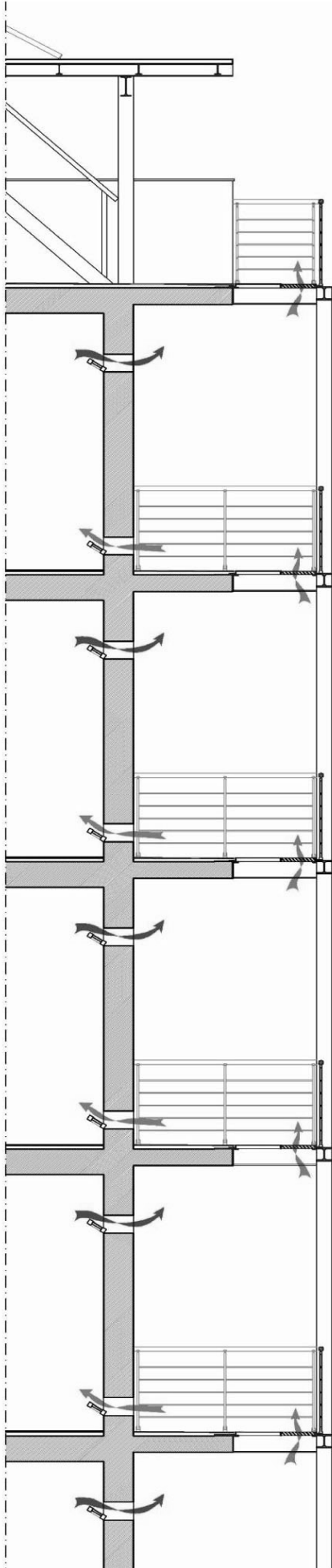


Fig. 1 , Il raffrescamento passivo degli edifici- Progetto di riqualificazione di un edificio. Sezione verticale sul fronte Sud

invece caratterizzano il funzionamento della facciata ventilata e in genere dei sistemi "a doppia pelle".

Questo fatto richiede degli accorgimenti. Infatti, mentre resta possibile la ventilazione in senso orizzontale, non è invece possibile la ventilazione in senso verticale lungo la facciata. Questione fondamentale ai fini del raffrescamento, sia diurno che notturno.

La condizione ottimale al momento è data da grigliati in acciaio capaci di lasciare fluire l'aria, come già sperimentato, anche se questo produce limitazioni notevoli sotto il profilo della fruibilità e della privacy dello spazio cuscinetto, il quale specie nei periodi climatici miti può essere fruibile direttamente, come balcone o loggia.

In questo caso si potrebbe pensare ad una soluzione mista, come quella riportata in figura 1, che consentirebbero una certa azione di deflusso dell'aria calda verso l'alto, e comunque favorire possibili movimenti d'aria, (magari agevolati dalla ventilazione presente in copertura), o anche attraverso camini solari, o sistemi di tiraggio azionati dai venti dominanti (comignoli rotanti).

Un altro apporto al raffrescamento passivo può essere dato dalla ventilazione trasversale degli ambienti interni in direzione nord-sud. Al riguardo il normale sistema delle travi e il cassonetto dell'avvolgibile si pongono come ostacoli importanti al fluire dell'aria, tendendo a creare una stratificazione di aria calda che non consente di raffrescare il soffitto del solaio.

Questa limitazione potrebbe essere superata attraverso travi a spessore e sistemi di avvolgibili a sviluppo orizzontale e non verticale. Al riguardo non risultano sperimentazioni di completa schermatura di edifici con specifiche caratteristiche di raffrescamento passivo, ma piuttosto esistono interventi parziali e sporadici e su limitate porzioni di facciata. Lo stesso vale per le coperture, tranne alcuni casi di solai sottili, non coibentati, per realizzare stenditoi coperti.

#### **4. REQUISITI TECNOLOGICI DEL SISTEMA DI CHIUSURA SECONDARIO**

La specifica organizzazione del sistema di chiusura secondario dovrebbe tenere conto di tre fasce funzionali, riguardanti l'altezza del singolo alloggio, in questa ipotesi si intende fare riferimento alla tipologia di edifici multipiano, anche esistenti con riferimento a possibili interventi di riqualificazione.

- Una fascia alta prevalentemente dedicata all'illuminazione riflessa;
- una fascia intermedia prevalentemente destinata a ombreggiamento e ventilazione;
- una fascia bassa prevalentemente destinata a ombreggiamento e isolamento termico.

Questa ipotesi di suddivisione funzionale potrebbe essere non fattibile nel caso di schermature ad andamento verticale. I sistemi di schermature solari più noti e diffusi, sono quelli a lame, fisse o orientabili, ad andamento orizzontale o verticale; a seconda della larghezza si può variare da fasce di pochi centimetri a pannelli interi. La questione della ottimizzazione del sistema, se per elementi orizzontali o verticali, è tutta da verificare. In atto esiste una maggiore sperimentazione e produzione di sistemi a fasce orizzontali. Il sistema a lame, in cui la regolazione dell'inclinazione delle lame impedisce l'irraggiamento diretto e attraverso la riflessione produce una illuminazione indiretta di tipo diffuso e regolabile in intensità, consente il passaggio dell'aria e quindi la ventilazione.

Sino ad ora gran parte dell'attenzione è stata dedicata alla illuminazione e alla ventilazione mentre poco è stato ricercato sul possibile ruolo termico di sistemi di chiusura secondari. La chiusura secondaria deve essere staccata dalla parete e dai balconi (il che comporta una struttura apposita) per potere evitare che trasmetta calore alla struttura muraria e al tempo stesso possa, per ventilazione verticale, essere raffreddata e disperdere il calore. Inoltre nello spazio di climatizzazione dovrebbe essere possibile inserire anche altri tipi di filtro, come vetrate adeguate, che consentano in inverno i guadagni solari.

Restano fondamentali le caratteristiche della schermatura e dei suoi componenti per :

- tipo di morfologia, sviluppo a lame orizzontali, lame verticali, pannelli, altro;
- tipo di movimentazione, per apertura-chiusura e regolazione;
- tipo di materiale dei componenti.

Il sistema di schermatura e di conseguenza i singoli componenti dovrebbero avere i seguenti *requisiti necessari in periodo estivo*:

- forte capacità di riflessione dell'irraggiamento solare;
- bassa trasmittanza termica, ossia non devono trasmettere calore;
- bassa massa termica, ossia non devono accumulare calore.

Il sistema di schermatura e di conseguenza i singoli componenti dovrebbero avere i seguenti *requisiti necessari in periodo invernale* :

- capacità di impacchettamento;
- capacità di coibentazione notturna una volta chiusi.

In periodo invernale (l'argomento è da approfondire) e in condizioni di soleggiamento le schermature solari dovrebbero essere eliminate, per consentire i guadagni solari diretti per il riscaldamento della muratura e degli ambienti, e quindi nelle ore diurne di accumulare calore. Nelle ore notturne invece si richiede di potere chiudere il sistema di schermatura per realizzare una zona cuscinetto coibentata che non faccia disperdere il calore accumulato, intrappolandolo.

I sistemi di schermatura in produzione in genere non posseggono i requisiti citati contemporaneamente, ad esempio le schermature in alluminio, che sono tra le più diffuse, hanno una forte capacità di riflessione, ma anche alti valori di trasmittanza. D'altro canto eventuali forme di coibentazione comporterebbero un aumento nello spessore della lama con problemi al requisito dell'impacchettamento in dimensioni contenute.

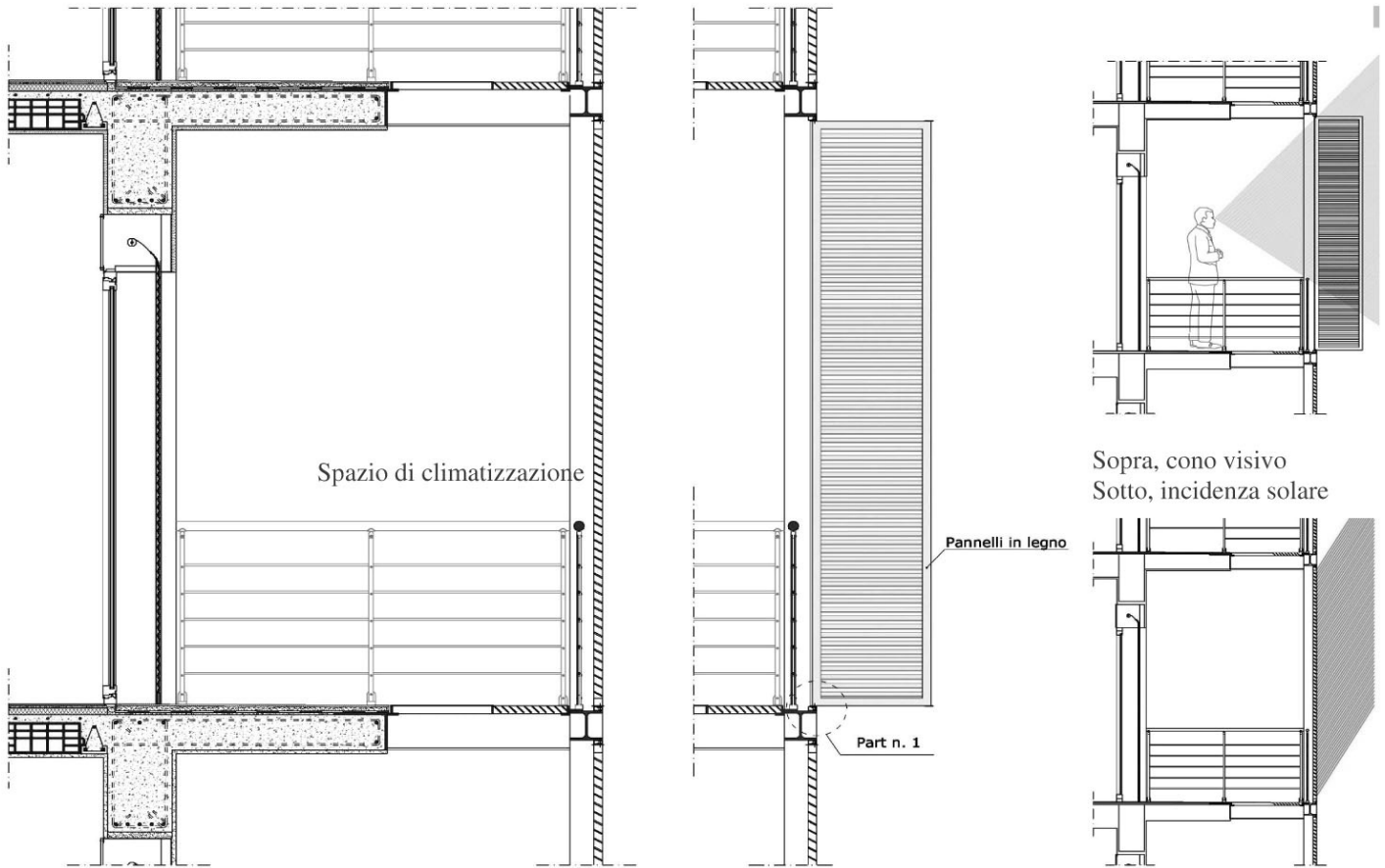
La raccolta a pacchetto è necessaria in periodo invernale, quando invece si richiede che le schermature vengano rimosse, e minimizzate, per consentire, oltre l'illuminazione, il beneficio degli apporti solari diretti.

Così come è necessaria in periodo estivo di notte per consentire un migliore raffrescamento della parete esterna e degli ambienti. Ai fini del rispetto dei requisiti prima detti per il periodo estivo, e dei requisiti che il sistema di schermatura dovrebbe avere in periodo invernale, che in pratica comportano una continua inversione dei ruoli, alcune tecnologie di schermature a pannelli possono considerarsi più efficaci dei sistemi a lame. Al riguardo non esistono ancora soluzioni ottimali e molto resta ancora da sviluppare sul piano della ricerca progettuale e della sperimentazione concreta.

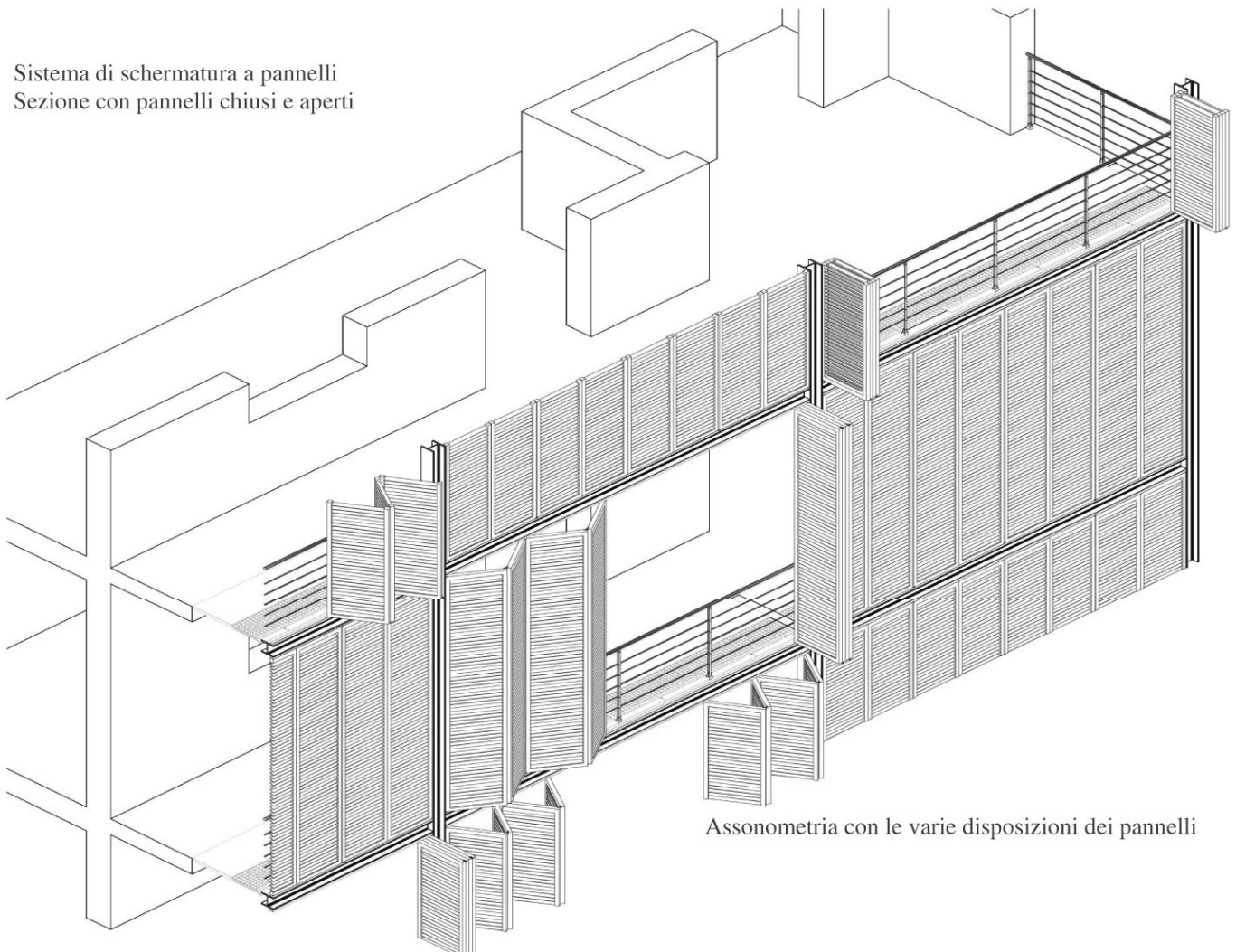
#### **5. SISTEMI DI CHIUSURA SECONDARIA**

*Pannelli orientabili, pieni e semipièni*

Il sistema di chiusura riportato in fig.2 riguarda un sistema a



Sistema di schermatura a pannelli  
Sezione con pannelli chiusi e aperti



Assonometria con le varie disposizioni dei pannelli

Fig. 2, Sistema di chiusura secondaria con pannelli pieni in legno, con sistema di movimentazione a soffietto

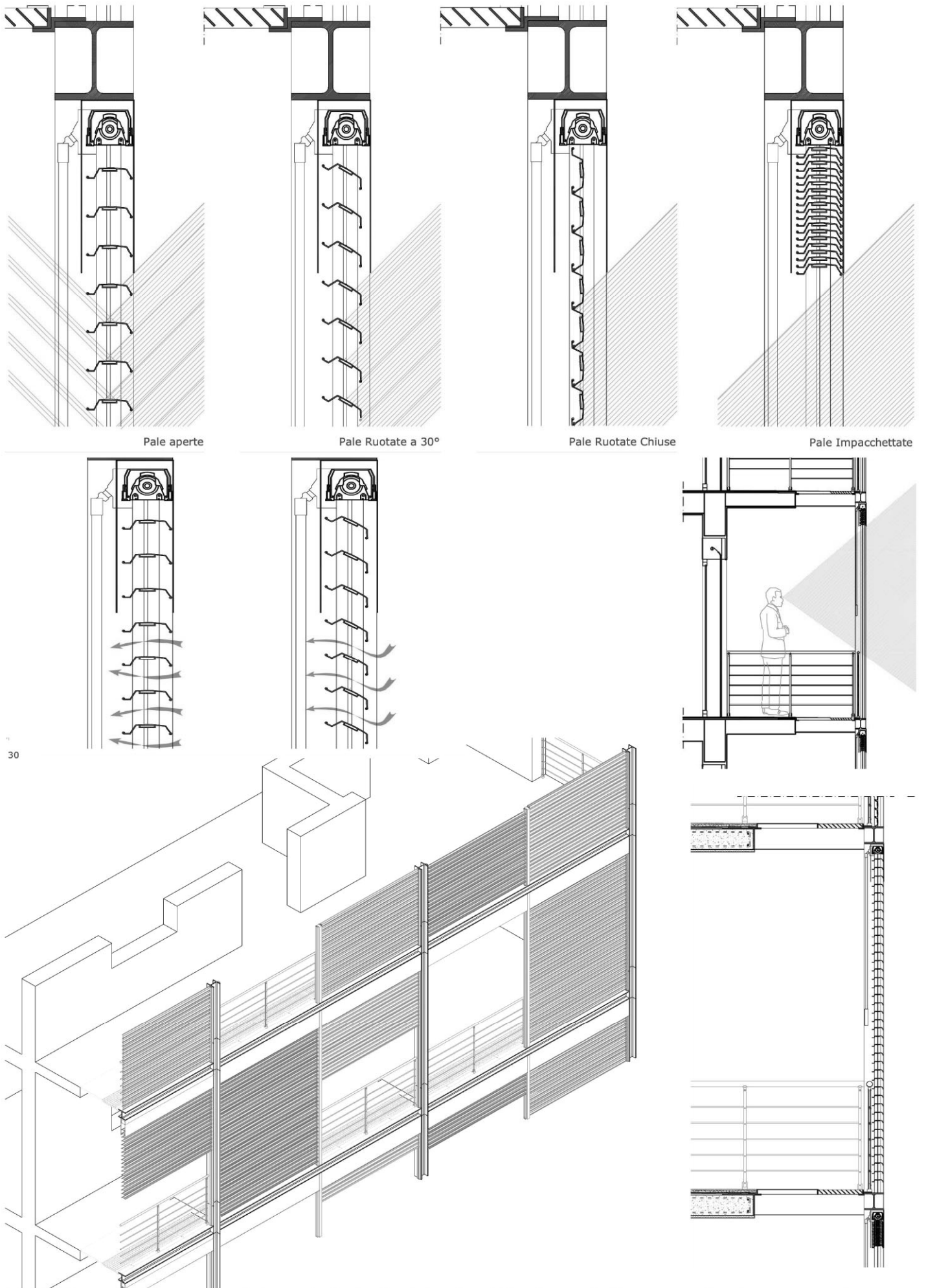
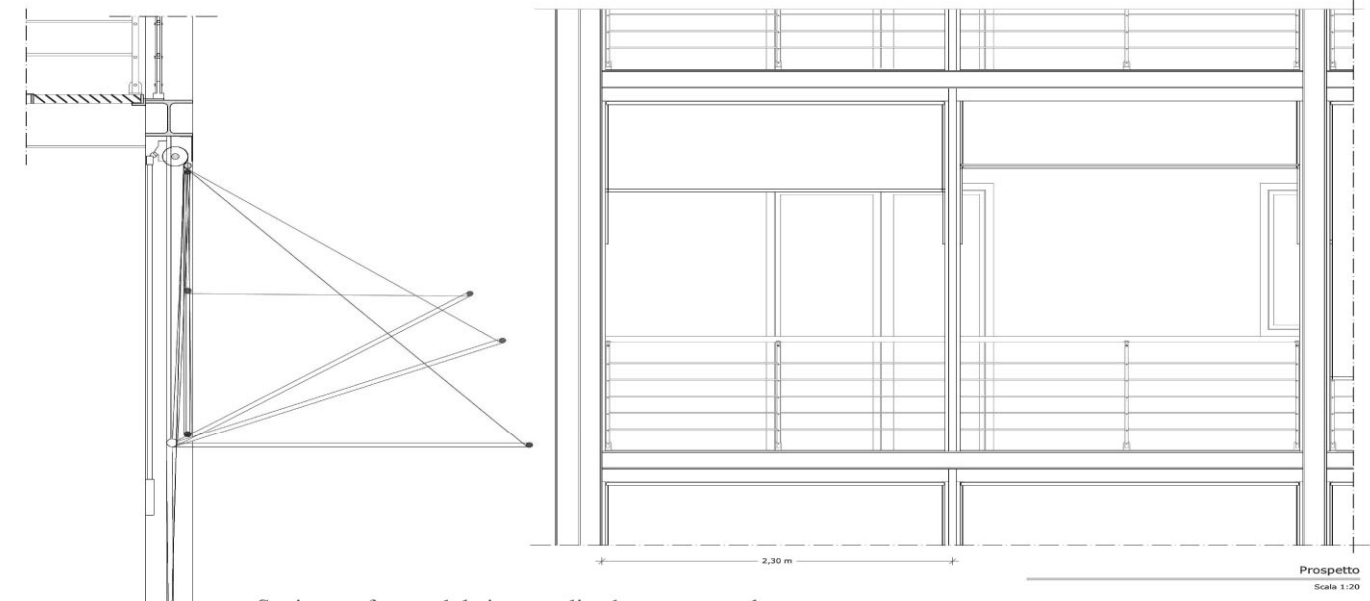
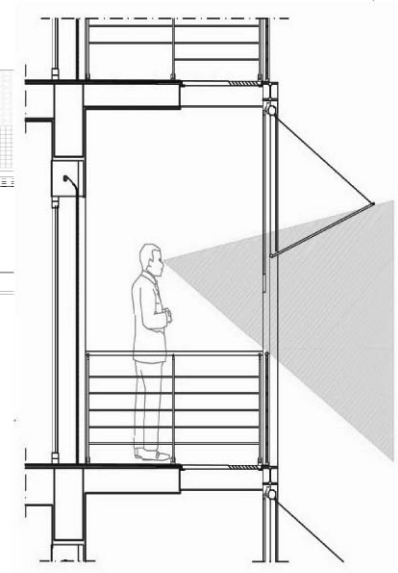
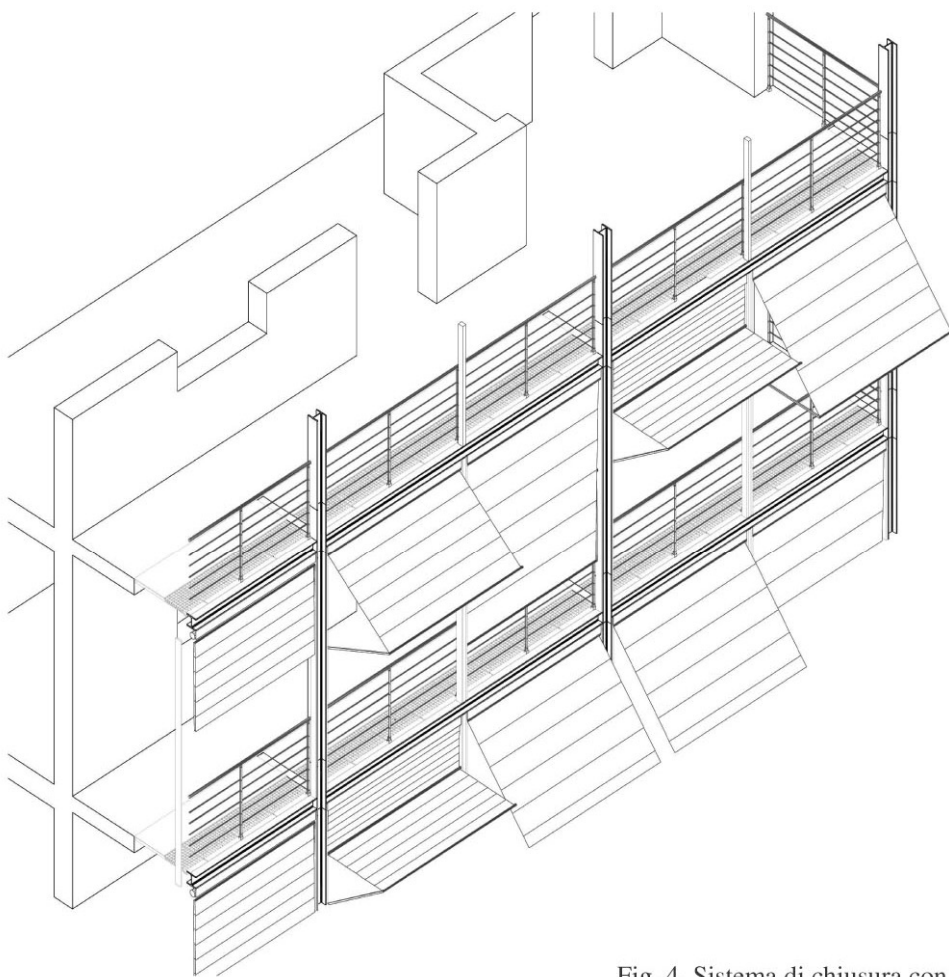
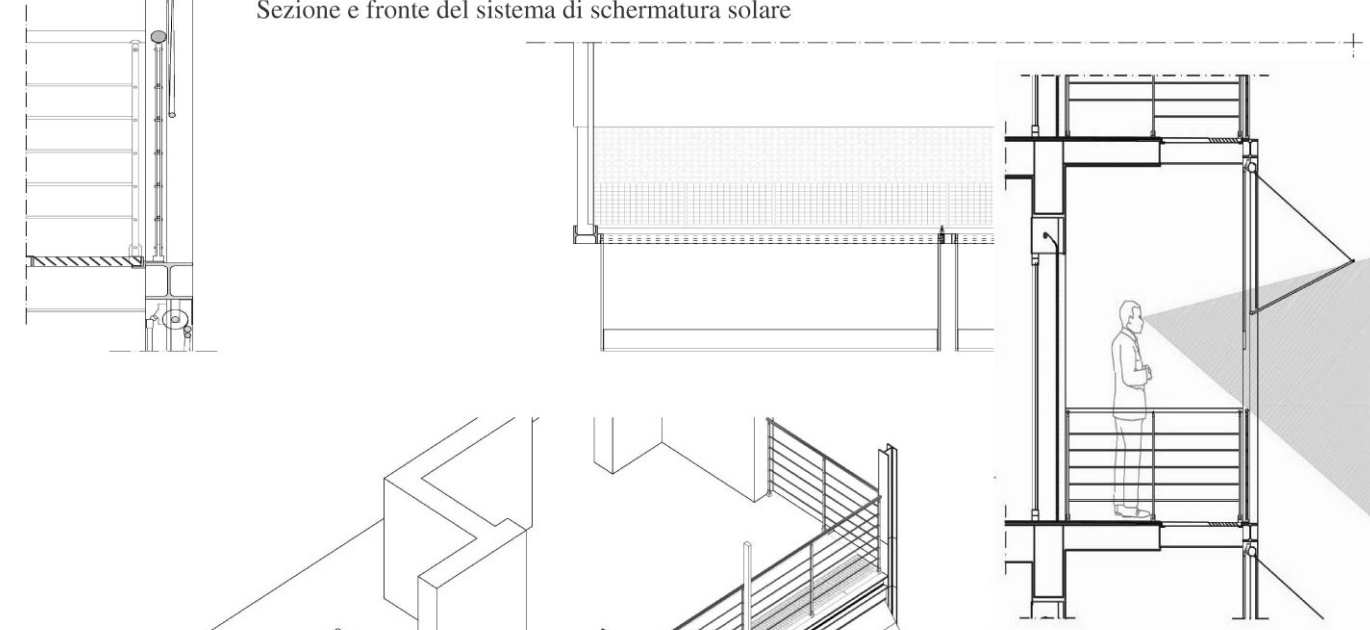


Fig. 3, Sistema di chiusura secondario con doghe in alluminio orientabili e sistema di chiusura con alloggiamento a pacchetto



Sezione e fronte del sistema di schermatura solare



Sopra cono visivo, sotto incidenza solare. A fianco assometria del sistema

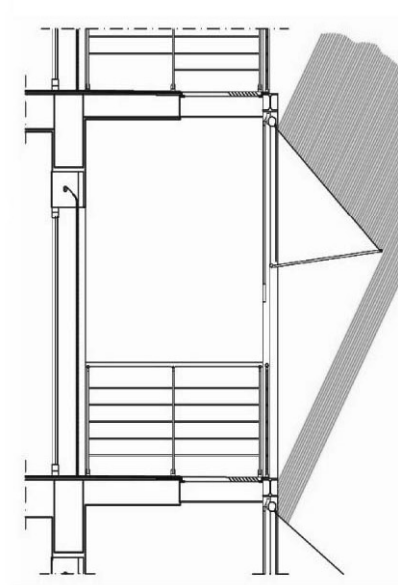


Fig. 4, Sistema di chiusura con tende avvolgibili su telaio orientabile

pannelli pieni con apertura a soffietto su guide di scorrimento orizzontali posizionate sulle travi della struttura prevista. Tali pannelli possono essere realizzati in vari materiali: alluminio coibentato, pvc ma anche legno. Il legno fornisce naturalmente grande valenza estetica al prospetto e anche un'alta coibenza termica qualora si volessero inserire pannelli laterali e chiudere l'intero spazio climatico. Ciò naturalmente determinerebbe un aumento dei costi di installazione e manutenzione.

Nel caso riportato i pannelli sono costituiti da alette inclinate a 45°, in questo caso fisse, ma che è possibile avere anche orientabili. Questo tipo di pannello riesce a garantire una completa schermatura nella posizione di totale chiusura e con alette distanziate consentirebbe la ventilazione. L'apertura avviene in modalità a soffietto con guide orizzontali in cui scorrono, e contemporaneamente ruotano, dei perni, rivestiti in gomma, per un movimento silenzioso. Nella posizione di completa apertura i pannelli vengono a posizionarsi ortogonalmente al piano della struttura così da non creare ingombro alla vista.

#### *Sistemi a lame e a doghe*

Il sistema riportato in fig.3 si riferisce ad un sistema frangisole con pale orizzontali orientabili, dato che il prospetto è esposto a sud, con possibilità di completo impacchettamento.

Questo garantisce una maggiore variabilità di conformazione rispetto ai modelli fissi, consentendo la vista completa da parte degli utenti dell'esterno o la possibilità di ricevere gli apporti solari invernali. Questo tipo di frangisole è fornito di posizionamento automatico delle lamelle a 30°-45°- 90°, in fase di discesa; di possibilità di orientamento in qualsiasi posizione; di abbassamento automatico delle lamelle a passo costante, in posizione di lavoro, con scelta della posizione. Ciò permette all'utente di poter graduare secondo le necessità la quantità di luce desiderata all'interno degli ambienti e dello spazio "cuscinetto", mantenendo sempre una certa ventilazione tra le singole pale. Le colorazioni esistenti in commercio sono numerosissime, ma naturalmente la scelta deve ricadere su colorazioni chiare per migliorare la riflessione solare.

#### *Sistemi di chiusura con tessuti intelaiati orientabili*

Le tende, che rappresentano uno dei più antichi sistemi di ombreggiamento, oggi sono caratterizzate da soluzioni tecnologicamente molto evolute e molto diverse tra di loro. Il sistema riportato in fig.4 è caratterizzato da una notevole varietà di conformazioni riuscendo così a rispondere con grande efficacia alle varie esigenze degli utenti. Permette la protezione dai raggi solari diretti senza impedire la contemporanea possibilità di veduta e ventilazione.

Il sistema prevede una tenda verticale a caduta guidata, con elemento guida a scorrimento lineare, braccia di caduta a molla per mantenere una tensione costante della tela con angolo di proiezione di 180° e guscio protettivo per il rullo di avvolgimento della tela. Le operazioni di avvolgimento, svolgimento e manovra dei bracci avvengono manualmente tramite asta di manovra collegata ad apposito argano. Particolari sono i nuovi tessuti in fibra di vetro rivestita in PVC che grazie alla loro trama reticolata, permettono la vista verso l'esterno e la penetrazione della luce escludendo allo stesso tempo i dannosi raggi ultravioletti.

*I disegni riportati in figura 1, 2, 3 e 4, fanno parte della Tesi di Laurea elaborata da Giovanna Chianetta su "Il raffrescamento passivo degli edifici", Relatore prof. Antonino Alagna, A.A. 2005-06, Facoltà di Architettura di Palermo, sede di Agrigento.*

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. AA. VV., *I sistemi di facciata. Serie Guida alla progettazione*, ed. BE-MA, Milano, 1987.
2. Bazzocchi F., *Facciate ventilate: architettura, prestazioni e tecnologia*, Alinea Editrice, Firenze, 2002.
3. Brunoro S., *Efficienza energetica delle facciate*, Maggioli Editore, Rimini, 2006.
4. Chew Yit Lin M. - *Staining of facades*, ed. Word Scientific, New Jersey-London, 2003
5. Colafranceschi D., *Sull'involucro in architettura : Herzog Nouvel Perrault Piano Prix Suzuki Venturi Wines*, Edizioni Librerie Dedalo, Roma, 1996.
6. Coppa A., *Facciate a secco*, ed. Motta, Milano, 2006.
7. Deo Prasad and Mark Snow (eds.), *Designing with Solar Power*, Earth-scan Publications, London 2005.
8. Deutsches Kupferinstitut (Hg.), *Architektur & Solarthermie*, Verlag Das Beispiel, Darmstadt, 2002.
9. Allard F., Ghiaus C., *Natural Ventilation in the Urban Environment*, Earthscan Publications, London 2005.
10. Gauzin-Muller D., *Case Ecologiche*, Ed. Ambiente, 2006,
11. Gauzin-Müller D., *Sustainable Living: 25 International Examples*, Birkhäuser Verlag, Basilea 2006.
12. Gernot Minke and Friedemann Mahlke, *Building with Straw: Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Birkhäuser, Basle 2005.
13. Gernot Minke, *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Birkhäuser Verlag, Basilea, 2006.
14. Gonzalo R., Habermann K.J., *Energy-Efficient Architecture: Basics for Planning and Construction*, Birkhäuser Verlag, Basilea 2006.
15. Graf A., *Das Passivhaus - Wohnen ohne Heizung*, Callwey, München 2000.
16. Grosso M., *Il raffrescamento passivo degli edifici*, Maggioli, Rimini, 1997.
17. Gunßer C., *Energiesparsiedlungen. Konzepte -Techniken - Realisierte Beispiele*, Callwey, München, 2000.
18. H. Krapmeier, E. Drössler (Hg.), *CEPHEUS. Wohnkomfort ohne Heizung*, Springer, Wien 2001.
19. Hans M. Henning (ed.), *Solar Assisted Air-Conditioning in Buildings*, Springer Verlag, Vienna 2004.
20. Herzog T., *Atlante delle facciate*, ed. UTET, Torino, 2005
21. Ken Yeang, *Ecodesign: A Manual for Ecological Design*, Wiley-Academy Press, London 2005.
22. M. Santamouris and Peter Wouters (eds.), *Building Ventilation*, Earthscan Publications, London 2005.
23. Mottura G., Pennisi A., *Progettare sistemi di protezione solare degli edifici*, Maggioli, Rimini, 2006.
24. Pizzi E., *I sistemi di facciata*, ed. BE-MA, Milano, 1989.
25. Richards J., *Facadism*, ed. Routledge, London-New York, 1994.
26. Sala M., *Recupero edilizio e bioclimatica: strumenti, tecniche e casi studio*, Sistemi editoriali Esselibri
27. Schittich C. (Hg.), *im Detail: Gebäudehüllen Konzepte, Schichten, Material*, Edition Detail, München, in Kooperation mit Birkhäuser, Basel 2001.
28. Trevisi A. S., Perago A., Laforgia D., Ruggiero F., *Efficienza energetica in edilizia*, Maggioli Editore S.p.A., Rimini, 2007.
29. Ursula Eicker, *Solar Technologies for Buildings*, John Wiley & Sons, Chichester 2003.
30. Vaughn Bradshaw, *The Building Environment: Active and Passive Control Systems, 3rd Edition*, John Wiley & Sons, 2006.

## IMPIANTO STAND-ALONE CON ACCOPPIAMENTO DI UN CAMPO FOTOVOLTAICO E UN ELETTROLIZZATORE, INTEGRATO CON CELLE A COMBUSTIBILE.

Giampaolo Crosa, Maurizio Lubiano, Federica Traverso, Angela Trucco

Università di Genova, Dipartimento di Macchine, Sistemi Energetici e Trasporti  
Via Montallegro 1, 16145 - Genova – Tel: 010.3532457 – Fax: 010.3532566 – e-mail: salabi@unige.it

### SOMMARIO

Nell'articolo viene proposto l'utilizzo dell'idrogeno come vettore di stoccaggio energetico per l'ottimizzazione dello sfruttamento di fonti energetiche alternative caratterizzate da elevata stocasticità di produzione.

Viene presentato un impianto SAPS, "Stand Alone Power System" per un'unità abitativa, costituito da un sistema di generazione fotovoltaico avente una potenza di picco di 3.75 kW, il quale, oltre ad alimentare i carichi domestici, utilizza l'energia prodotta in eccesso per alimentare un elettrolizzatore. Quest'ultimo produce idrogeno, compresso ed accumulato in serbatoi pressurizzati per essere utilizzato, all'occorrenza, come combustibile per un sottosistema di *fuel cell* di tipo PEM. In tal modo l'energia chimica dell'idrogeno può essere nuovamente trasformata in elettricità al fine di soddisfare le necessità dell'utenza anche nei periodi di insolazione insufficiente od assente. L'idrogeno viene pertanto utilizzato per realizzare uno stoccaggio stagionale e non più solo giornaliero, in alternativa a quello classico basato su accumulatori al piombo.

Un modello dinamico dell'impianto è stato realizzato e implementato in ambiente Matlab/Simulink; ripetuti cicli di simulazione hanno permesso di studiarne il comportamento al variare delle condizioni climatiche durante l'anno, e di definire il dimensionamento e le caratteristiche dei componenti principali. Sono infine presentati alcuni risultati significativi delle simulazioni ed una valutazione economica dei costi di primo impianto.

### DESCRIZIONE IMPIANTO SAPS

L'impianto proposto ed analizzato in questo articolo è un sistema "Stand Alone", alimentato mediante pannelli fotovoltaici, dimensionato per soddisfare integralmente i bisogni elettrici di una unità abitativa situata a Genova e destinata ad accogliere una famiglia di 4 persone.

Il progetto, schematizzato in Fig.1, prevede l'installazione di un campo fotovoltaico in grado di garantire, durante le ore di luce, l'energia elettrica necessaria alle utenze, immagazzinando l'eccesso di produzione non nei classici accumulatori al piombo ma sotto forma di idrogeno gassoso. L'impianto comprende un elettrolizzatore capace di scindere l'acqua distillata in idrogeno e ossigeno, i quali, opportunamente immagazzinati in uno stoccaggio ad alta pressione, costituiscono la riserva di combustibile di una fuel cell. Quest'ultima dovrà essere in grado di fornire la potenza elettrica necessaria alle utenze nelle ore notturne e diurne di insufficiente insolazione.

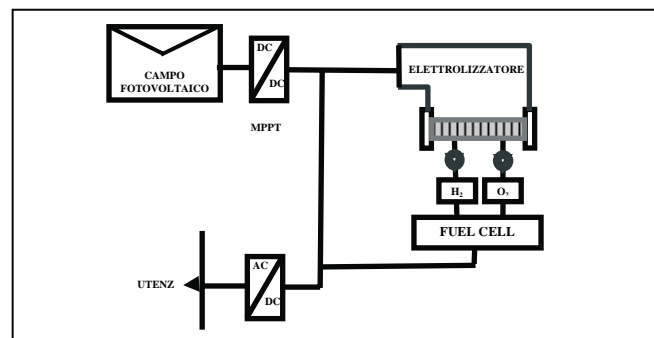


Fig.1: Schema dell'impianto SAPS studiato

I componenti principali dell'impianto sono pertanto:

- un campo fotovoltaico, composto da 50 moduli, avente una potenza di picco di 3.75 kW, e relativa elettronica di controllo (Maximum Power Point Tracker);
- un elettrolizzatore della potenza nominale di 3 kW, con relativo sistema di compressione ed immagazzinamento dell' $H_2$  e dell' $O_2$ ;
- una cella a combustibile, tipo PEM, da 3 kW nominali;
- un inverter DC/AC ad elevata efficienza da 3 kW nominali.

E' stato considerato per l'utenza monofamigliare un carico elettrico massimo di 3 kW e stimato un consumo medio giornaliero di 8.5 kWh

### Dimensionamento impianto

La ricerca del miglior dimensionamento del sistema è stato operato tramite un simulatore dinamico, implementato in ambiente Matlab/Simulink [1].

Il modello matematico permette di quantificare con precisione l'energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici durante le ore di luce nonché l'energia non consumata dalle utenze e quindi immagazzinata, grazie all'elettrolizzatore, sotto forma di  $H_2$  ed  $O_2$ .

Come già accennato, il classico sistema di accumulo di energia in forma elettrochimica, realizzato mediante batterie al piombo, è stato in questo caso sostituito da un sistema elettrolizzatore-stoccaggio ad alta pressione-cella a combustibile, al fine di realizzare un accumulo stagionale. La variabilità nel tempo di tutti i parametri di funzionamento significativi del sistema energetico considerato (consumi, insolazione, accumuli energetici, rendimenti di funzionamento dei componenti, etc.) è stata adeguatamente considerata grazie alla modellazione dinamica utilizzata per le simulazioni.

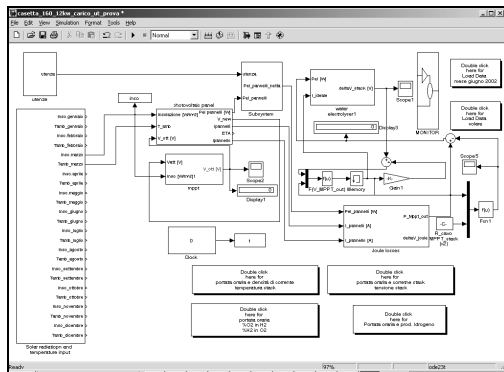


Fig.2: Implementazione del modello in Matlab-Simulink

Dal punto di vista dell'implementazione in ambiente Matlab/Simulink del modello matematico del sistema in esame, la struttura del simulatore conserva, sotto forma di blocchi separati e riconoscibili, tutti i principali componenti dell'impianto (campo fotovoltaico, cablaggi e M.P.P.T., elettrolizzatore, cella a combustibile, sistema di compressione e stoccaggio dei gas, inverter, logiche di controllo)

Le prime simulazioni dell'impianto hanno consentito di dimensionare i principali componenti in modo da realizzare l'autosufficienza elettrica dell'abitazione senza eccessivi sovradimensionamenti degli apparati e soprattutto del sistema di accumulo in pressione.

## COMPONENTI DELL'IMPIANTO

### Campo fotovoltaico

Si è scelto di utilizzare, per il campo fotovoltaico, un modulo commerciale, lo *Shell SP75*, contenente 36 celle di silicio monocristallino da 125 x 125 mm, collegate in serie, e capace di generare una potenza STC di 75 W a 17 V [2].

Il sistema di pannelli è stato collegato alle utenze dirette mediante un convertitore DC/DC ad alta efficienza, utilizzato come "Maximum Power Point Tracker", al fine di regolarne, in ogni istante, la tensione di funzionamento, per ottenere la massima potenza elettrica in qualsiasi condizione d'insolazione e temperatura ambiente [1] [3].

Dalle analisi effettuate è risultato conveniente realizzare un campo fotovoltaico di 50 pannelli, caratterizzato pertanto da una potenza di picco di 3.75 kW<sub>p</sub>. Essendo pari a 0.6324 m<sup>2</sup> l'area occupata dal singolo modulo, ne è risultata una superficie totale del campo fotovoltaico pari a 31.6 m<sup>2</sup>.

Per quanto concerne i dati relativi ai livelli di insolazione medi utilizzati nel corso dello studio, si è considerato che l'abitazione così attrezzata fosse sita a Genova (lat. 44°23'49" Nord, long. 8°53'44" Est) e che i pannelli fossero orientati verso Sud, con un'inclinazione di 35° rispetto al piano orizzontale [4].

Il grafico in Fig.3 riporta l'andamento dei valori d'irradianza globale a cielo reale utilizzati e relativi ai giorni caratteristici di ogni mese dell'anno. Si noti come l'irradianza, ovvero il flusso luminoso incidente per unità di superficie, sia naturalmente variabile durante l'anno solare come intensità massima e durata nei giorni.

### Elettrolizzatore e storage

Nell'impianto studiato è presente un elettrolizzatore alimentato dalla corrente prodotta dal campo fotovoltaico e

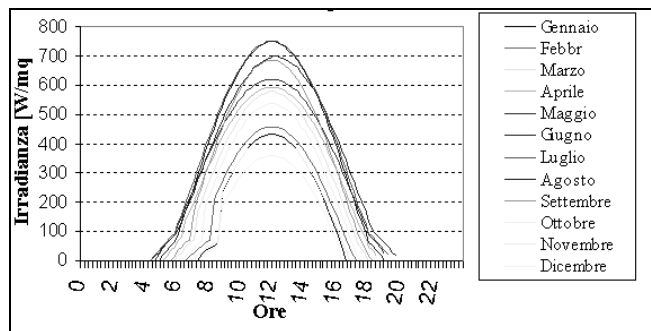


Fig.3: Dati relativi all'irradianza, cielo reale, durante l'anno

non direttamente utilizzata dalle utenze.

Nell'ambiente Matlab-Simulink è stato modellizzato il funzionamento di un elettrolizzatore, prodotto dalla Casale Chemicals S.A., avente una potenza nominale di 3 kW. In un volume pari a circa 1,4x1,4x0.6 m, sono contenuti: uno stack pressurizzato a 15 bar di 21 celle elettrolitiche bipolari, un serbatoio per l'elettrolita, uno per l'acqua distillata di reintegro, le tubazioni di ricircolo ed i serbatoi di accumulo primario e separazione dell'idrogeno e dell'ossigeno, lo scambiatore di raffreddamento dell'elettrolita, ed i sistemi di controllo e filtraggio dei gas [5]. La produzione di idrogeno istantanea dipende dall'intensità della corrente di alimentazione. Il rendimento di conversione nominale è pari a circa lo 0,88, mentre quello istantaneo varia in funzione della densità di corrente nelle celle. L'idrogeno viene prodotto ad una pressione massima di 15 bar, e con una purezza minima di 99.98%. L'immagazzinamento ad alta pressione dei gas prodotti ha reso necessario un sottoimpianto composto da:

- 2 serbatoi, detti *Buffer*, da porsi all'uscita dell'elettrolizzatore per contenere temporaneamente i gas prodotti ad una pressione leggermente inferiore ai 15 bar di funzionamento dell'elettrolizzatore;
- 2 compressori alternativi, per trasferire l'O<sub>2</sub> e l'H<sub>2</sub> nei relativi accumuli ad alta pressione;
- 2 serbatoi ad alta pressione, detti *Storage*, contenenti la riserva di gas con cui alimentare la fuel cell, composti da più bombole di dimensioni standard, collaudate per una pressione massima di 200 bar (come da normativa di sicurezza).

### Fuel Cell

La fuel cell è un dispositivo elettrochimico che consente di convertire direttamente l'energia chimica di reazione dell'idrogeno con l'ossigeno in energia elettrica. Nel caso analizzato, essa verrà alimentata con i gas immagazzinati nelle bombole che compongono lo storage, per fornire energia alle utenze nelle ore in cui la potenza elettrica prodotta dal campo fotovoltaico risulti essere nulla o comunque insufficiente.

Si è considerato di utilizzare una fuel cell, avente pressione operativa compresa nell'intervallo cioè tra 0.7÷17 bar, realizzando la caduta di pressione necessaria tramite una coppia di valvole di laminazione tra storage e fuel cell. Considerando la quantità di idrogeno prodotta ed il carico richiesto dalle utenze si è ritenuto adeguata per l'impianto una fuel cell della potenza di 3 kW.

## ANALISI DEI RISULTATI

Il modello implementato in Matlab-Simulink e le simulazioni dinamiche hanno permesso di dimensionare i

componenti dell'impianto e valutare le loro prestazioni istantanee ed integrali, così come quella complessiva del sistema.

Si è potuta calcolare infatti l'energia elettrica prodotta dal campo fotovoltaico al variare delle stagioni, utilizzando un giorno caratteristico per ogni mese e ricavando la potenza prodotta al variare dell'insolazione durante la giornata. A queste curve è stata inoltre sottratta la curva rappresentativa del carico elettrico medio richiesto dall'utenza domestica durante la giornata. Quest'ultima è stata implementata prendendo a riferimento i consumi tipici di un nucleo familiare composto da 4 persone (ipotizzato essere di circa 8.5 kWh/giorno), con i caratteristici picchi giornalieri. Tutti questi andamenti sono stati riportati nel grafico di Fig. 4.

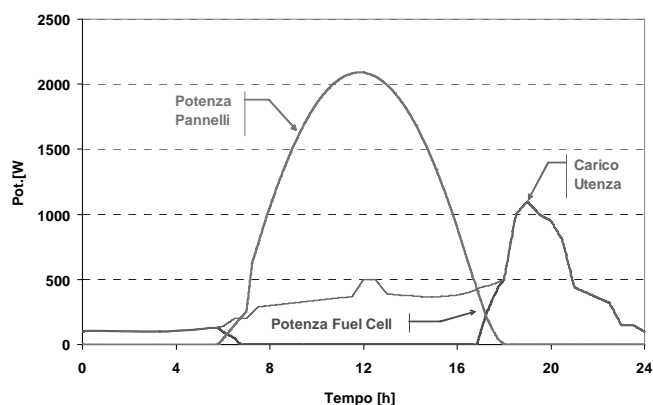


Fig.4: Andamento giornaliero della potenza elettrica prodotta dal campo fotovoltaico, assorbita dall'utenza e prodotta dalla fuel cell relativamente al mese di Marzo.

Nelle ore in cui l'energia prodotta dal campo solare risulti maggiore di quella richiesta dalle utenze, queste ultime vengono direttamente alimentate dai pannelli fotovoltaici, mediante il convertitore DC/AC. Nelle ore in cui il carico richiesto dalle utenze risulta maggiore dell'energia fornita dall'impianto fotovoltaico, tipicamente nelle ore notturne e nelle ore serali invernali, il gap di potenza è colmato dalla fuel cell.

Durante la stagione estiva il livello di irradianza è tale per cui il campo solare è in grado di soddisfare direttamente il carico diurno (max 650÷750 W/m<sup>2</sup>) e di produrre una quantità d'idrogeno eccedente il consumo giornaliero della fuel cell. Pertanto una parte dell'idrogeno prodotto potrà essere stoccata nello storage per coprire il deficit di produzione, anche diurno, della stagione invernale, che presenta livelli d'insolazione assai più bassi (max 350÷450 W/m<sup>2</sup>) [4].

È stata effettuata una simulazione della produzione di idrogeno e ossigeno e del bilancio energetico su base annua.

Nella prima colonna di Tab.1 è riportata la quantità di idrogeno, in normalmetricubi, prodotta nel giorno tipo rappresentativo dell'insolazione del singolo mese.

La quantità massima di idrogeno prodotto si attesta attorno a 3.6 Nm<sup>3</sup>/giorno nel mese di Luglio, in cui la potenza del campo fotovoltaico raggiunge i 2.5 kW nelle ore a maggiore irradianza; la portata di idrogeno massima risulta essere di 0.45 Nm<sup>3</sup>/h.

Per quanto riguarda i mesi invernali, in particolare per il mese di Dicembre, la portata di idrogeno massima prodotta è stata pari a 0.21 Nm<sup>3</sup>/h, in corrispondenza di una potenza massima del campo solare di 1.37 kW.

Tab.1: Quantità prodotte di ossigeno e idrogeno e bilancio.

Mesi	H <sub>2</sub> prodotto [Nm <sup>3</sup> /giorno]	H <sub>2</sub> fuel cell [Nm <sup>3</sup> /giorno]	Accumulo H <sub>2</sub> [Nm <sup>3</sup> /mese]
Gennaio	1.44	2.68	-38.57
Febbraio	1.69	2.53	-23.55
Marzo	2.50	2.27	7.23
Aprile	2.84	2.08	22.64
Maggio	3.09	1.97	34.72
Giugno	3.43	1.90	46.00
Luglio	3.60	1.94	51.33
Agosto	3.48	2.02	45.11
Settembre	2.99	2.19	23.78
Ottobre	2.09	2.42	-10.28
Novembre	1.40	2.66	-37.80
Dicembre	1.07	2.52	-45.04
Totale	-	-	75.56

Le quantità di idrogeno riportate nella terza colonna di Tab.1 corrispondono a quanto consumato dalla fuel cell per alimentare il carico in assenza di insolazione.

Nel grafico seguente (Fig.5) è riportata la quantità di idrogeno prodotta mensilmente, si noti come l'andamento durante l'anno ricopi abbastanza fedelmente quello dell'irraggiamento solare.

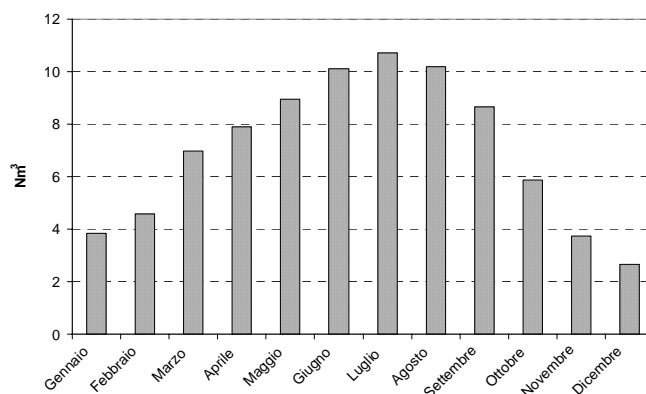


Fig.5: Grafico della produzione mensile di idrogeno nell'anno tipo

Nell'ultima colonna sono stimati i bilanci mensili di idrogeno ottenuti a partire dai risultati della simulazioni giornaliere.

Risulta evidente come nei mesi estivi si accumuli idrogeno (segno positivo) al netto della quantità necessaria per soddisfare il carico notturno; tale riserva verrà utilizzata per soddisfare le utenze durante i mesi invernali (segno negativo), nei quali il campo fotovoltaico non è in grado di coprire giornalmente il fabbisogno dell'utenza.

Si può ricavare pertanto un bilancio su base mensile della quantità di gas prodotto ed utilizzato, che permette di dimensionare il sistema di stoccaggio. I risultati sono riportati nel grafico in Fig.6.

I serbatoi di stoccaggio per idrogeno e ossigeno sono stati pertanto dimensionati basandosi sulle quantità di gas complessivamente prodotte nei mesi estivi. Il totale di idrogeno prodotto in tale periodo e quindi da immagazzinare è risultato pari a 230 Nm<sup>3</sup>.

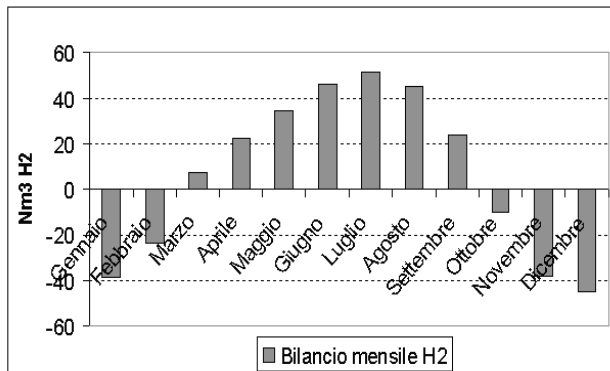


Fig.6: Bilancio mensile dell'accumulo di idrogeno

Il totale delle quantità di idrogeno necessarie a soddisfare l'utenza nel periodo invernale è risultato invece essere pari a 154.4 Nm<sup>3</sup>; si è deciso di dimensionare i pannelli per questo positivo di bilancio in modo da garantire l'autonomia dell'abitazione anche nel caso di un maggiore consumo di energia elettrica o di condizioni meteorologiche particolarmente sfavorevoli. Per l'eventuale eccesso di produzione dell'idrogeno rispetto alla capacità dell'accumulo potrebbe essere facilmente smaltita integrando, ad esempio, il sistema di riscaldamento con pompe di calore, utilizzabili altresì durante il periodo caldo nel condizionamento.

Il problema dello stoccaggio dell'idrogeno è legato fondamentalmente al grande volume occupato da questo gas anche se compresso a pressioni elevate.

Come già accennato in precedenza, i gas prodotti nel processo di elettrolisi vengono veicolati nei "buffer", ad una pressione inferiore ai 15 bar di lavoro dell'elettrolizzatore, e successivamente compressi fino alla pressione delle bombole dello "storage", che possono raggiungere il livello massimo di 200 bar. La fase di accumulo è stata modellizzata tramite un modello a parametri concentrati utilizzando le equazioni fondamentali della termofluidodinamica [1]. In particolare sono stati rappresentati i due compressori volumetrici alternativi necessari per comprimere i gas fino alla pressione massima richiesta allo storage (200 bar).

Il funzionamento del sistema di compressione è stato analizzato mese per mese; in particolare, per il mese di luglio, caratterizzato dai più elevati valori d'insolazione, si è determinato un consumo elettrico di compressione dell'idrogeno pari a circa 6.5 KWh.

Analoga modellazione è stata attuata per quanto concerne lo stoccaggio dell'ossigeno. Anche la dinamica della fase d'accumulo è stata attentamente analizzata e monitorata in particolare nel mese di Luglio per quanto concerne il serbatoio storage dell'idrogeno (Fig.7).

Nel dimensionare i serbatoi di "storage", è stato considerato per O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> un comportamento da gas perfetti; per effetto delle differenti masse molari è naturalmente risultato che, mentre in condizioni Normali, la densità risulta pari a 0.08984 kg/m<sup>3</sup> per l'idrogeno, per l'ossigeno risulta essere di 0.787 kg/m<sup>3</sup>, mentre alla pressione massima di stoccaggio di 200 bar, i volumi occupati da 1 kg di gas sono rispettivamente di 0.063 m<sup>3</sup> per l'idrogeno e 0.004 m<sup>3</sup> per l'ossigeno.

Considerando uno stoccaggio massimo di 230 Nm<sup>3</sup> di idrogeno, questo compresso a 200 bar occupa un volume di 1.3 m<sup>3</sup>. Per lo stoccaggio si è considerato di utilizzare delle bombole standard della capacità di 0.0736 m<sup>3</sup> ciascuna, in numero di 18. Per l'ossigeno è risultato sufficiente un volume di accumulo, a 200 bar, pari a 0.06 m<sup>3</sup>, corrispondente quindi ad una sola bombola standard.

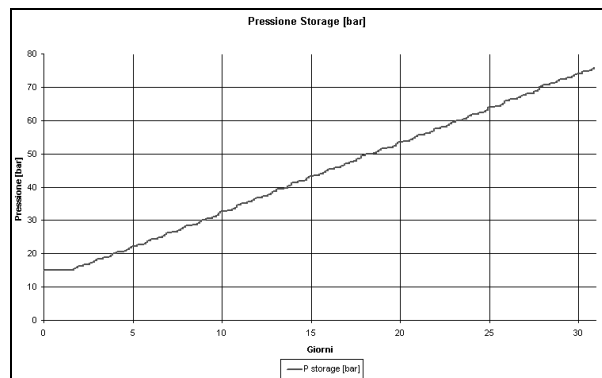


Fig.7: Andamento della pressione all'interno dello Storage nel mese di Luglio

## CONSIDERAZIONI ECONOMICHE

Occorre premettere come sia difficile realizzare una valutazione precisa del costo di realizzazione di questo impianto a causa della novità del progetto e della scarsità di realizzazioni commerciali simili, eccetto alcune installazioni sperimentali [7]; pertanto si invita a considerare la stima complessiva come indicativa.

Ai costi delle componenti principali dell'impianto andranno sommati quelli dei sistemi di sicurezza e di rilevazione di eventuali perdite della stazione di produzione e stoccaggio dei gas, anche se per ragioni di sicurezza risulterebbe conveniente installare tali impianti in locazione apposita, naturalmente ventilata.

### Campo fotovoltaico

Avendo ipotizzato di usare 50 moduli fotovoltaici di tipo *Shell SP75*, del costo di 358 € l'uno, l'ammontare complessivo di costo dei pannelli risulterebbe essere di 17900 €. Occorre poi considerare il costo di un convertitore DC/AC della potenza di 3 kW, per alimentare le utenze dell'abitazione, circa 2500 € ed il costo del convertitore DC/DC (MPPT) di circa 2500 € il materiale elettrico dei cablaggi ed i costi di installazione [2]. Quindi si può stimare un costo complessivo dell'ordine di 25 000 €.

### Elettrolizzatore e storage

L'impianto descritto è basato sulle caratteristiche di un elettrolizzatore prodotto dalla Casale Chemicals S.A. avente una potenza nominale di 3 kW, il cui costo è dell'ordine di 60 000 €, cifra comprendente anche il sistema di purificazione dei gas.

Occorre poi considerare i costi dei compressori alternativi necessariamente distinti per i due gas. Per arrivare a 200 bar è sufficiente un compressore a due stadi. L'ordine di costo di ogni compressore è stimabile in 3 500 €[6].

Per lo "storage" sono necessarie delle bombole in grado di contenere i gas compressi a 200 bar nella quantità necessaria a rendere autonoma l'abitazione. Dal dimensionamento effettuato sono risultate necessarie 18 bombole per immagazzinare l'idrogeno ed una sola per l'ossigeno, aventi un costo unitario dell'ordine di 230 € per un costo complessivo di circa 4 500 €. Contenitori analoghi sono già stati utilizzati per altri sistemi che utilizzano la tecnologia delle fuel cell. Oltre alle voci di costo suddette occorre considerare due sistemi di laminazione per abbassare la

pressione dai 200 bar massimi dello “storage” fino a quella ottimale per le fuel cell. Il costo complessivo di questa parte di impianto è stato valutato essere dell’ordine di 78 000 €

### Fuel Cell

Per quanto riguarda una stima del costo di una fuel cell di tipo PEM da 3 kW, essendo tale componentistica ancora a livello preindustriale, si può pensare ad un costo di 24 000 €

Fuel cell di tipo PEM utilizzanti, ad esempio, le *proton exchange membrane* prodotte da Ballard [8] possono comunque garantire una lunga vita, alta affidabilità, possibilità di espansione, ridotte necessità di installazione, assenza di emissioni dannose, potenza e voltaggio comparabili alle batterie.

### Sicurezza

Per un impiego sicuro dell’idrogeno gli attuali sistemi in commercio di rilevamento di eventuali fughe sono voluminosi, complessi e molto costosi, ed il loro funzionamento, inoltre, è disturbato dall’interferenza di segnali elettromagnetici. La soluzione a tali inconvenienti, a cui la ricerca sta lavorando, è rappresentata dall’introduzione di sensori a fibra ottica o costituiti da sottili membrane.

Il costo del sistema di sicurezza è stimabile al 5% del valore della parte di impianto comprendente elettrolizzatore e fuel cell, dell’ordine quindi di 5 000 €

### CONCLUSIONI

In prima approssimazione il costo di realizzazione di questo progetto è dell’ordine di 132 000 € Questa soluzione impiantistica permette di rendere un’abitazione autosufficiente dal punto di vista energetico, è completamente svincolata

dall’utilizzo di risorse fossili e quindi ha un impatto ambientale praticamente nullo. Il costo assai elevato è dovuto allo stadio ancora prototipale della tecnologia utilizzata per molti dei componenti chiave del sistema, che sono in grado di garantire rendimenti di funzionamento accettabili solo ricorrendo alle soluzioni tecnologicamente più evolute e pertanto meno economiche.

Il simulatore dinamico ha dimostrato di costituire uno strumento potente per analizzare l’evoluzione, per qualsiasi condizione di funzionamento, di un sistema energetico così complesso, consentendo l’implementazione di adeguate logiche di controllo ed una variazione agevole dei parametri di funzionamento e costruttivi dei singoli componenti.

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Maurizio Lubiano, Giacomo Picco, “Simulazione dinamica di un impianto per la produzione di idrogeno solare integrato con celle a combustibile”, tesi di laurea, DIMSET, Università di Genova, 2004
2. [http://www.tecnospot.it/schede/sp75\\_it.pdf](http://www.tecnospot.it/schede/sp75_it.pdf)
3. Maurizio Lubiano, Giampaolo Crosa, Angela Trucco, “Modelling of PV-Powered Water Electrolysers”, ASME Turboexpo 2006.
4. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/radmonth.php?lang.it&map.europe>
5. Casale Chemicals S.A., “Electrolysis Unit Description”, User Handbook, 2005
6. M.S. Peters, K.D. Timmerhouse, *Plant design and economics for chemical engineers*, McGrawHill
7. Traverso Federica, “Studio termodinamico del processo di elettrolisi dell’acqua ed esempio applicativo”, tesi di laurea, DIMSET, Università di Genova, 2004.
8. [www.ballard.com](http://www.ballard.com).



## REFORMING DELL'ETANOLO PER L'ALIMENTAZIONE DI CELLE A COMBUSTIBILE A CARBONATI FUSI

Federico Rossi<sup>1</sup>, Mirko Filippini<sup>1</sup>, Naida Corsi<sup>2</sup>, Margherita Giuliobello<sup>2</sup>, Cristina Amelio<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via G. Duranti, 67 – 06125 Perugia (PG),

<sup>2</sup>IPASS S.c.a.r.l. Ingegneria Per l'Ambiente e lo Sviluppo Sostenibile, Via G. Guerra 23 – 06127 Perugia (PG),

<sup>3</sup>FN S.p.a. Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, SS 35 bis dei Giovi km 15 – 15062 Bosco Marengo (AL)

### SOMMARIO

Un interessante esempio di applicazione delle fonti rinnovabili di origine agricola è l'impiego di etanolo per l'alimentazione di celle a combustibile a carbonati fusi (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC). Per tale scopo l'etanolo deve essere convertito in idrogeno attraverso un processo di steam reforming. Le MCFC risultano particolarmente idonee a tale tipo di applicazione in virtù degli elevati limiti di tollerabilità delle impurezze presenti nei prodotti della reazione di conversione ed in virtù delle elevate temperature operative (650°C) che consentono di integrare il dispositivo di reforming direttamente all'interno dello stack. Nel seguente lavoro sono riportati i risultati delle prove di reforming di etanolo puro e bioetanolo ottenuto dalla fermentazione di melassa di barbabietola da zucchero. Le prove sono state condotte mediante l'impiego di un reattore dimensionato per l'integrazione all'interno del comparto anodico di sistemi MCFC di piccola taglia.

### INTRODUZIONE

Attualmente si producono 500 miliardi di Nm<sup>3</sup> all'anno di idrogeno [1], di cui il 60% è ottenuto da reforming di idrocarburi leggeri, il 30% da cracking di idrocarburi pesanti, 7% da gassificazione del carbone, 3% da elettrolisi.

Tutti questi processi richiedono energia. Per tale motivo, l'idrogeno così prodotto non può essere considerato una fonte di energia, bensì un vettore energetico. Tra i vantaggi offerti dall'impiego dell'idrogeno in campo energetico, il più importante è quello di ridurre o addirittura eliminare le emissioni di sostanze inquinanti. Nei processi che impiegano idrogeno come vettore di energia, il principale (se non l'unico) prodotto delle reazioni che avvengono è l'acqua; pensiamo ad esempio all'uso in motori a combustione interna o alla produzione di energia elettrica nelle celle a combustibile.

Tali benefici ambientali, tuttavia, vengono meno se l'idrogeno così utilizzato è prodotto con metodi che prevedono l'estrazione da idrocarburi, i quali comportano un rilascio di CO<sub>2</sub> (di origine fossile). Anche per l'elettrolisi, che di per sé produce solo H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, vale lo stesso discorso se l'energia elettrica necessaria a far avvenire il processo proviene da fonti fossili.

Il discorso è diverso se l'idrogeno è ottenuto a partire da fonti rinnovabili (eolico, fotovoltaico, idroelettrico, geotermico, biomasse), in questo caso si riesce a realizzare un ciclo produttivo totalmente "pulito".

L'etanolo costituisce una risorsa rinnovabile in quanto ottenibile da biomasse vegetali. Il ciclo di produzione dell'etanolo è neutro sul piano della CO<sub>2</sub>, in quanto l'anidride carbonica prodotta è pari a quella consumata nella fase di crescita della biomassa.

L'etanolo rappresenta un ottimo "vettore idrogeno". Attraverso il processo di steam reforming dell'etanolo è infatti possibile produrre idrogeno in maniera semplice, economica e

pulita.

Diversi studi termodinamici [2-3] hanno dimostrato la fattibilità dello steam reforming dell'etanolo per produzione di idrogeno per l'alimentazione di celle a combustibile.

I vantaggi legati a tale tipo di applicazione aumentano se viene utilizzato bioetanolo. Tale prodotto non è altro che etanolo non sottoposto a distillazione per il quale quindi i costi di produzione e l'energia impiegata risultano inferiori rispetto a quelli dell'etanolo puro.

Il presente lavoro riguarda la sperimentazione relativa allo steam reforming di etanolo puro e bioetanolo condotta per mezzo di reattore integrabile con celle a combustibile a carbonati fusi di piccola taglia di concezione innovativa.

### COMBUSTIBILI RIFORMATI

#### Bioetanolo e etanolo puro

La campagna sperimentale ha riguardato prove di reformer di etanolo puro e bioetanolo. Il bioetanolo costituisce il prodotto intermedio della filiera bioenergetica dell'etanolo ottenuto da biomasse (vedi figura 1).

Sia il bioetanolo che l'etanolo puro da biomassa sono prodotti che si ottengono tramite processo di fermentazione alcolica di diversi prodotti agricoli ricchi di carboidrati e zuccheri quali i cereali (mais, sorgo, frumento, orzo), le colture zuccherine (bietola e canna da zucchero), frutta, patate e vinacce. Dopo degli opportuni trattamenti avviene il processo di fermentazione alcolica.

La fermentazione alcolica è un processo di tipo micro-aerofilo che opera la trasformazione dei glucidi contenuti nelle produzioni vegetali in bioetanolo. Sottoponendo il bioetanolo ad un processo di distillazione si ottiene etanolo puro.

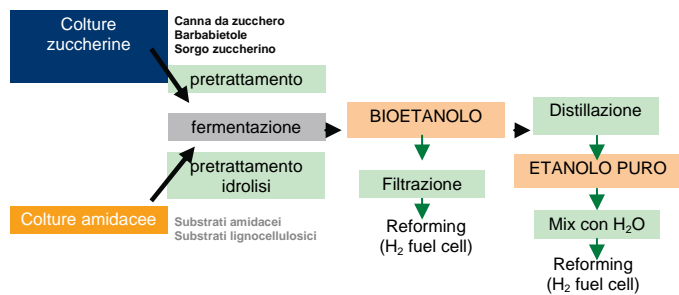


Figura 1: Filiera dell'etanolo ottenuto da biomasse

Tra i diversi biocarburanti in fase di sperimentazione, il bioetanolo e l'etanolo puro costituiscono il miglior compromesso tra prezzo, disponibilità e prestazioni.

**Etanolo puro.** L'etanolo è un alcol a corta catena la cui formula bruta è  $C_2H_6O$  (o  $C_2H_5OH$  o  $CH_3CH_2OH$ ).

Nella tabella 1 vengono riportati i dati relativi alla quantità di etanolo ottenibile con le tecnologie standard in funzione delle diverse tipologie di coltura ed i costi corrispondenti.

Tabella 1: Dati relativi alla produttività dell'etanolo ottenuto da biomassa.

Tipologia di coltura	Produzione di etanolo (t/ha)	Costi di produzione (€t)
Canna da zucchero	7	140 (Brasile)
Mais	3	450 (USA)
Barbabietola	4	500 (E.U.)

Le proprietà chimico-fisiche e termodinamiche dell'etanolo puro sono riportate nella tabella 2.

Il bilancio energetico del processo di produzione dell'etanolo puro è positivo. Il suo potere calorifico risulta infatti superiore rispetto all'energia necessaria per la sua produzione:

- Potere calorifico dell'etanolo puro = 33,80 MJ/l;
- Energia per ottenere 1l di etanolo puro = 4,9 MJ/l per la coltivazione (mais) + 14 MJ/l per distillazione = 18,9 MJ/l.

**Bioetanolo.** Il bioetanolo è costituito per circa il 10% in volume da etanolo, per circa l'80% da acqua e per il 10% da residui solidi.

Il bilancio energetico del processo di produzione del bioetanolo è positivo. Il suo potere calorifico risulta infatti superiore rispetto all'energia necessaria per la sua produzione:

- Potere calorifico del bioetanolo = 27,56 MJ/l;
- Energia per ottenere 1l di bioetanolo = 4,9 MJ/l per la coltivazione (mais).

Nel caso del bioetanolo suddetto bilancio è migliore rispetto a quello dell'etanolo puro poiché nel processo di produzione non bisogna tener conto dell'energia necessaria per la distillazione.

Per le prove di reformer è stato utilizzato bioetanolo con la seguente composizione, espressa in percentuali in volume:

- etanolo  $CH_3CH_2OH \rightarrow 9\%$ ;
- sostanza secca  $\rightarrow 13,5\%$ ;
- acqua  $\rightarrow 77,5\%$ .

In figura 2 è mostrato un campione del bioetanolo impiegato

Tabella 2: Proprietà dell'etanolo puro

Caratteristiche generali	
Formula bruta o molecolare	$C_2H_6O$
Massa molecolare (uma)	46,07
Aspetto	liquido incolore
Numero CAS	64-17-5
Proprietà chimico-fisiche	
Densità ( $g/cm^3$ )	0,79
Indice di rifrazione a 20°C	1,3611 (589 nm)
Solubilità in acqua	completa
Costante di dissociazione acida	$1,26 \times 10^{-16}$ (25°C)
Temperatura di fusione (K)	158,8 (-114.3°C)
$\Delta_{fus}H^0$ ( $kJ \cdot mol^{-1}$ )	4,9
$\Delta_{fus}S^0$ ( $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ )	31
Temperatura di ebollizione (K)	351,5 (78.4°C)
$\Delta_{eb}H0$ ( $kJ \cdot mol^{-1}$ )	38,56
Proprietà termochimiche	
$\Delta_f H^0$ ( $kJ \cdot mol^{-1}$ )	-277,6
$\Delta_f G^0$ ( $kJ \cdot mol^{-1}$ )	-174,8
$S_m^0$ ( $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ )	160,7
$C_{p,m}^0$ ( $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ )	112,3
Indicazioni di sicurezza	
Flash point (K)	285 (12°C)
Temperatura di autoignizione (K)	698 (425°C)



Figura 2: Campione di bioetanolo utilizzato nel corso della sperimentazione

Prima di essere sottoposto a reforming il bioetanolo è stato filtrato con particolari dischi di carta per eliminare la sostanza secca presente.

Tale operazione ha permesso di ottenere una miscela con la seguente composizione:

- etanolo  $CH_3CH_2OH \rightarrow 10\%$ ;
- acqua  $\rightarrow 90\%$ .

## APPARATO SPERIMENTALE

### Catalizzatore

Il catalizzatore del processo di reforming è stato realizzato trattando, con la tecnica di adsorbimento/precipitazione, una polvere finissima di allumina. Il trattamento prevede, nella prima fase, la deposizione per adsorbimento di un sottile strato di nichel sulla superficie della polvere di allumina impiegando acetilacetato. Nella fase successiva, la polvere così ottenuta viene sottoposta ad un trattamento termico in forno con atmosfera inerte di azoto. Il trattamento termico consiste nel raggiungimento della temperatura massima di 650 °C e nella permanenza a questa temperatura per un tempo di 2 ore.

La polvere finale è finissima, conservando in pratica la granulometria dell'allumina di partenza, e di colore verdino. La polvere è stata sottoposta alle analisi IR (FTIR) per la valutazione di efficienza di catalisi tramite la molecola sonda CO, con risultati soddisfacenti (vedi spettro di figura 3).

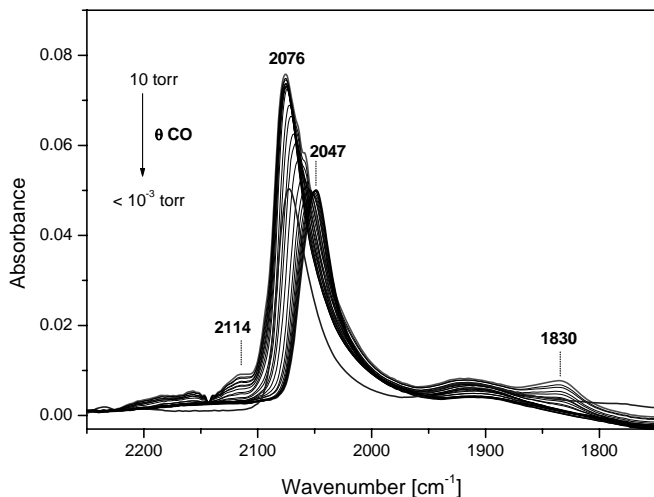


Figura 3: Spettro relativo al catalizzatore messo a punto analisi spettrofotometrica FTIR con molecola sonda CO

L'analisi economica del processo di produzione del catalizzatore ha mostrato che non vi sono differenze di costo significative tra i diversi sali di nichel, quindi la scelta del reagente precursore è stata fatta in base ai seguenti criteri:

- semplicità di preparazione;
- adattabilità della preparazione su polvere al sistema "a pellets";
- ripetibilità su scala industriale della tecnica (costi delle materie prime, tempi di preparazione, attrezzature, etc.);
- riduzione o eliminazione delle problematiche di impatto ambientale (emissioni in atmosfera di NO<sub>x</sub> a seguito dei trattamenti termici) associate all'utilizzo di Sali nitrati come precursori.

Nelle figure 4 e 5 vengono riportate le immagini del catalizzatore ottenute con il microscopio elettronico a scansione (SEM) a differenti ingrandimenti (rispettivamente 100x e 1000x).

### Dispositivo di reformer

Il dispositivo di reformer utilizzato nel corso della sperimentazione è costituito da un reattore in acciaio di forma cilindrica con dimensioni interne idonee all'inserimento nel comparto anodico di una MCFC di piccola taglia di

concezione innovativa in fase di sperimentazione presso il laboratorio CIRIAF di Terni.

Il reattore è costituito da anelli e piatti in acciaio inox del diametro esterno di 170 mm con interposte reti metalliche del diametro di 95 mm per la deposizione del catalizzatore.

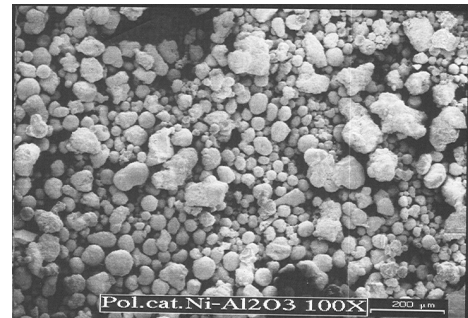


Figura 4: Immagine SEM 100x del catalizzatore in polvere

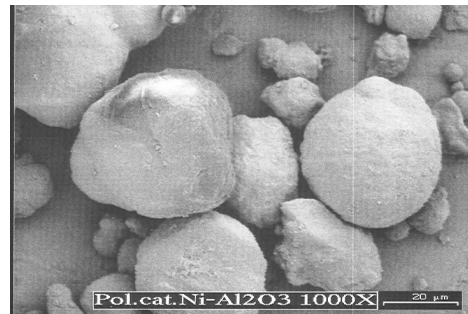


Figura 5: Immagine SEM 1000x del catalizzatore in polvere

In figura 6 è mostrato il catalizzatore depositato sulla rete in acciaio inox.

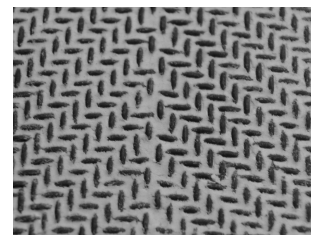


Figura 6: Catalizzatore depositato su rete in acciaio inox

Il reformer, una volta assemblato, è stato portato ad una temperatura di esercizio di 650 °C utilizzando una resistenza ceramica a fascia controllata per mezzo di controllori di potenza. Per il controllo della temperatura sono state installate termocoppie di tipo K.

La temperatura di funzionamento del reattore coincide con quella operativa della MCFC ed è stata selezionata proprio in previsione della successiva integrazione del sistema di reforming con la cella stessa. Studi recenti [4-5] hanno dimostrato che per tale temperatura, fissato il rapporto molare acqua/etanolo a pressione atmosferica, la produzione di idrogeno è massima mentre viene minimizzata la formazione di CO e CH<sub>4</sub> evitando depositi di carbonio sul catalizzatore.

Le prove di reformer sono state effettuate utilizzando sia etanolo puro (liquido miscelato ad acqua bidistillata) che bioetanolo (liquido).

Per l'alimentazione della miscela di etanolo/acqua bidistillata e del bioetanolo è stata utilizzata una pompa elettromagnetica con membrana a secco della LMI Milton Roy con portata massima di 0,75 l/h, pressione massima di 10,3 bar e cadenza da 1 a 60 colpi/min.

A monte dell'impianto di reformer è stato posizionato uno scambiatore di calore per la miscelazione/vaporizzazione della miscela di alimentazione prima dell'ingresso nel reattore. Il sistema di riscaldamento del vaporizzatore/miscelatore è stato realizzato utilizzando una resistenza ceramica a fascia dello stesso tipo utilizzato per il riscaldamento del reformer.

Una volta attraversato il dispositivo di reformer, il gas in uscita viene raffreddato attraverso uno scambiatore di calore tubo in tubo acqua-gas che permette di condensare ed eliminare i vapori presenti all'interno del gas stesso. Il gas in uscita dallo scambiatore può quindi essere prelevato ed analizzato con un gascromatografo per determinarne la composizione e verificare le prestazioni del reformer in termini di idrogeno prodotto. Nella figura 7 si riporta il layout dell'impianto di reformer.

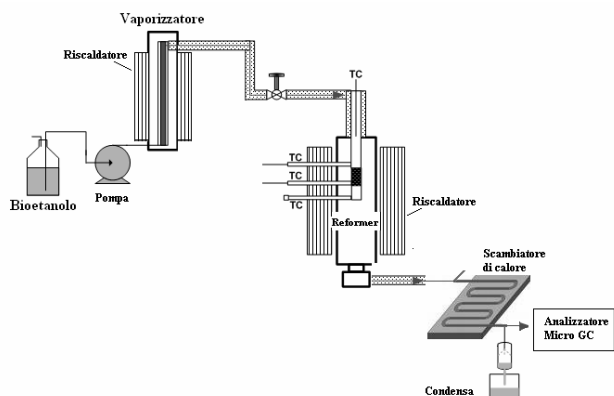
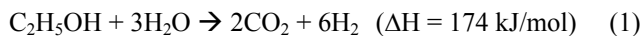


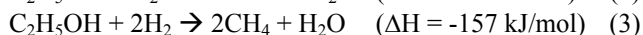
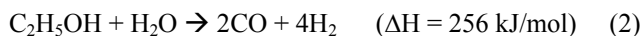
Figura 7: Schema di funzionamento del dispositivo di reforming

## RISULTATI SPERIMENTALI

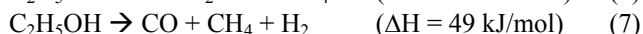
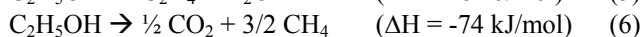
La reazione base sia per il reforming dell'etanolo che del bioetanolo è la seguente



Studi precedenti [6-7] condotti su catalizzatori dello stesso tipo di quelli utilizzati nella presente sperimentazione hanno dimostrato che nel corso della reazione si può avere la formazione di prodotti indesiderati come CO e CH<sub>4</sub>:



Altre reazioni secondarie che possono produrre composti indesiderati sono la deidrogenazione ad acetaldeide, la deidratazione dell'etanolo ad etilene, la decomposizione dell'etanolo a CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> e la decomposizione dell'etanolo a CO, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>:



## Prove di reformer dell'etanolo

Nella prima fase della sperimentazione è stato impiegato come combustibile da riformare una miscela di etanolo/acqua bidistillata al 20% (v/v) di etanolo.

La frequenza di alimentazione utilizzata è di 0,1 l/h. La temperatura del dispositivo di reformer è stata portata a 650°C e mantenuta costante a tale valore durante tutto il corso della prova. Sono stati prelevati regolarmente campioni del gas in uscita durante un arco temporale di circa 200 ore.

I campioni sono stati quindi analizzati mediante tecnica gascromatografica che ha permesso di determinare la quantità di idrogeno prodotto, nonché quella di altri composti presenti all'interno del gas. Il grafico di figura 6 riporta l'andamento nel tempo della percentuale di idrogeno (concentrazione in volume) presente all'interno del gas in uscita dal reformer durante la prova di durata.

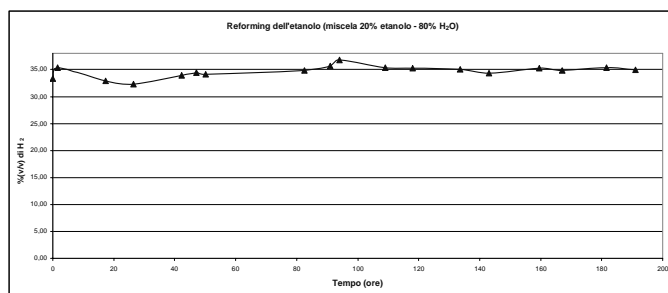


Figura 8: Concentrazione in volume di idrogeno presente nel gas in uscita dal dispositivo di reformer

Nella tabella 3 viene riportata la concentrazione media dei componenti principali della miscela gassosa in uscita dal dispositivo di reformer.

L'elevata produzione di CO, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub> suggerisce la decomposizione dell'etanolo a monossido di carbonio, metano e idrogeno o la deidrogenazione dell'etanolo con concomitante adsorbimento per dare acetaldeide ed idrogeno:

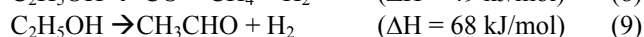
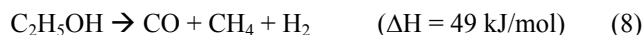


Tabella 3: Composizione media dei campioni analizzati

Sostanza	Concentrazione % (v/v)
H <sub>2</sub> (%)	35,31
O <sub>2</sub> (%)	0,38
N <sub>2</sub> (%)	6,15
CH <sub>4</sub> (%)	20,79
CO (%)	21,80
CO <sub>2</sub> (%)	2,98

## Prove di reformer del bioetanolo

Nella seconda fase della sperimentazione è stato impiegato bioetanolo come combustibile da riformare. La frequenza di alimentazione è stata impostata sulla frequenza massima della pompa (0,75 l/h). La temperatura del dispositivo di reformer è stata portata a 650°C e mantenuta costante a tale valore durante tutto il corso della prova. Sono stati prelevati regolarmente campioni del gas in uscita durante un arco temporale di circa 83 ore.

I campioni sono stati quindi analizzati mediante tecnica gascromatografica che ha permesso di determinare la quantità di idrogeno prodotto, nonché quella di altri composti presenti all'interno del gas.

Il grafico di figura 8 riporta l'andamento nel tempo della percentuale di idrogeno (concentrazione in volume) presente all'interno del gas in uscita dal reformer.

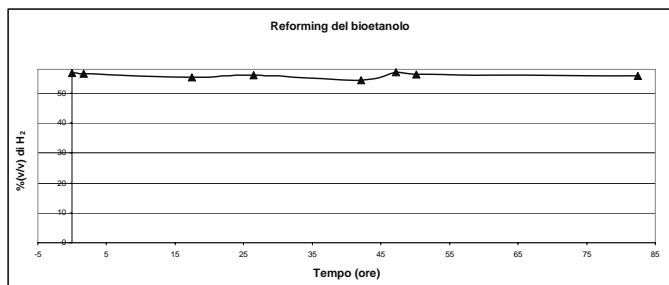


Figura 8: Concentrazione in volume di idrogeno presente nel gas in uscita dal dispositivo di reformer

Nella tabella 4 viene riportata la concentrazione media dei componenti principali della miscela gassosa in uscita dal dispositivo di reformer

L'elevata produzione di CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> suggerisce che durante il processo di reforming avvengono anche reazioni di formazione di metano e di reforming del metano stesso:

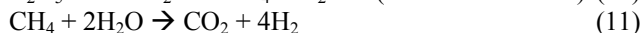
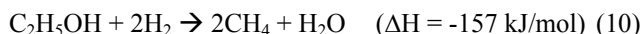


Tabella 4: Composizione media dei campioni analizzati.

Sostanza	Concentrazione % (v/v)
H <sub>2</sub> (%)	56,02
O <sub>2</sub> (%)	0,37
N <sub>2</sub> (%)	3,04
CH <sub>4</sub> (%)	8,49
CO (%)	--
CO <sub>2</sub> (%)	19,03

## CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato progettato e realizzato un impianto sperimentale per la produzione di idrogeno da etanolo puro e bioetanolo mediante processi di reforming. Lo studio ha riguardato, sia lo studio dei catalizzatori del processo di reforming che la progettazione e la successiva realizzazione di tutti i componenti (vaporizzatore, reattore, condensatore) che costituiscono l'impianto stesso.

I risultati ottenuti nel corso della sperimentazione aprono la strada allo sviluppo di sistemi per il reformer di etanolo e/o bioetanolo integrabili con celle a combustibile a carbonati fusi di piccola taglia.

Per quanto riguarda le prove di reformer dell'etanolo, a fronte di buone prestazioni in termini di produzione di idrogeno del sistema realizzato (percentuale volumetrica media di idrogeno nei gas di uscita pari al 56%), i risultati hanno messo in evidenza la formazione di alcuni prodotti indesiderati quali CO (22% in volume) e CH<sub>4</sub> (21% in volume) nel corso della reazione.

Risultati migliori sono stati ottenuti con il bioetanolo. Le

prove di reformer condotte con questo combustibile hanno infatti evidenziato un'efficienza, in termini di conversione in idrogeno, quasi doppia rispetto a quella ottenuta con la miscela etanolo/acqua bidistillata (percentuale volumetrica media di idrogeno nei gas di uscita pari al 56%). Migliori si sono avuti anche per quanto riguarda la presenza di sostanze indesiderate nei gas in uscita dal reattore. Nelle prove condotte con bioetanolo è stata infatti riscontrata una concentrazione molto più bassa sia di CH<sub>4</sub> (pari a circa l'8,5% in volume) che di monossido di carbonio (presente in quantità non misurabili dal gascromatografo).

Sia nelle prove condotte con l'etanolo che in quelle condotte con il bioetanolo è stata misurata nei gas in uscita dal reattore una concentrazione non trascurabile di CO<sub>2</sub>. Tale componente tuttavia non costituisce un inquinante per le MCFC dal momento che viene utilizzato come reagente per la reazione catodica.

Il bioetanolo infine, oltre a garantire una resa in termini di produzione di idrogeno, più elevata della miscela etanolo puro/acqua bidistillata presenta anche un vantaggio di tipo energetico. Il processo di produzione del bioetanolo infatti non include l'operazione di distillazione richiesta per la produzione dell'etanolo puro, questo fa sì che il bilancio energetico di produzione di tale prodotto risulti essere migliore rispetto a quello dell'etanolo stesso.

Gli sviluppi futuri della sperimentazione prevedono l'effettuazione di modifiche al sistema di reformer realizzato al fine di aumentare l'efficienza del processo di reforming sia per l'impiego con etanolo puro che bioetanolo.

## BIBLIOGRAFIA

1. M. Momirlan, T.N. Veziroglu, Int. J. Hydrogen Energy, 30, 795, 2005.
2. E.Y. Garcia, M.A. Laborde, Int. J. Hydrogen Energy, 16, 5, 307, 1991
3. K. Vasudeva, N. Mitra, P. Umasankar, S.C. Dhingra,
4. V. Fierro, O. Akdim, C. Mirodatos, Green Chem. 5, 20-24, 2003.
5. V. Klouz, V. Fierro, P. Denton, H Katz, J.P. Lisse, S. Bouvot-Mauduit, C. Mirodatos, J. Power Sources, 105, 26-34, 2002
6. S. Freni, G. Maggio, S. Cavallaro, J. Power Sources, 62, 67-127, 2001
7. T.ioanides, J. Power Sources, 92, 17-25, 2001



## UTILIZZAZIONE ENERGETICA DELL'OLIO VEGETALE PURO

Maurizio Carlini<sup>1</sup>, Sonia Castellucci<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DISAFRI Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse, Università della Tuscia via San Camillo de Lellis s.n.c 01100 Viterbo,

<sup>2</sup>GEMINI Dipartimento di Geologia e Ingegneria Meccanica Idraulica e Naturalistica per il Territorio, Università della Tuscia via San Camillo de Lellis s.n.c 01100 Viterbo

### SOMMARIO

Grande incentivazione allo sviluppo delle filiere energetiche dell'olio vegetale puro deriva dalla legge del 27 dicembre 2006 che incoraggia la produzione agricola delle materie prime oltre che l'utilizzo delle stesse.

Per olio vegetale puro si intende olio prodotto a partire da piante oleaginose mediante pressione o estrazione con solvente, può essere utilizzato sia grezzo, spremuto e filtrato, che raffinato; la pianta oleaginosa più diffusa sul territorio italiano è il girasole.

Si possono individuare due filiere: filiere locali, che nascono e si sviluppano all'interno dell'azienda agricola che diventa produttrice di energia elettrica e termica; e filiere agricolo-industriali in cui il settore agricolo è affiancato a quello industriale mediante contratti quadro o intese di filiera, regolati dal decreto legge 27 maggio 2005 n.102.

### PREMESSA

Il 16 febbraio 2005 è entrato in vigore il Protocollo di Kyoto, firmato nel dicembre 1997 a conclusione della terza sessione plenaria della Conferenza delle parti (COP3). Il Protocollo contiene obiettivi legalmente vincolanti e decisioni sull'attuazione operativa di alcuni degli impegni della Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici (United Nation Framework Convention on Climate Change).

Il Protocollo impegna i paesi industrializzati e quelli a economia in transizione (i paesi dell'Europa dell'Est) a ridurre complessivamente del 5,2% le principali emissioni antropogeniche di gas serra nel periodo compreso tra il 2008 e il 2012.

Il paniere di gas serra considerato nel Protocollo include sei gas: l'anidride carbonica, il metano, il protossido di azoto, i fluorocarburi idrati, i perfluorocarburi, l'esafluoruro di zolfo. L'anno di riferimento per la riduzione delle emissioni dei primi tre gas è il 1990, mentre per i rimanenti tre (che sono gas lesivi dell'ozono stratosferico e che per altri aspetti rientrano in un altro protocollo, il Protocollo di Montreal) è il 1995.

La riduzione complessiva del 5,2% non è identica per tutti i paesi. Per i paesi membri dell'Unione Europea nel loro insieme la riduzione dovrà essere pari all'8%, per gli USA al 7%, per il Giappone al 6%.

Per raggiungere gli obiettivi fissati nel Protocollo di Kyoto, la Commissione Europea ha adottato, nel dicembre 2005, un Piano di azione [1] volto a sviluppare l'utilizzazione delle energie rinnovabili agricole e forestali, in modo da ridurre le emissioni di gas serra, proteggere l'occupazione delle zone rurali e limitare la dipendenza dell'Europa riguardo alle importazioni di energia.

Lo sviluppo delle energie rinnovabili resta una priorità nell'agenda della politica energetica europea, in quanto non

sono ancora realmente decollate e l'obiettivo per il loro impiego al 2010, fissato al 12%, non raggiungerà che il 9-10%.

Le principali biomasse da promuovere, individuate nel Piano sono: i biocarburanti per i trasporti (oleaginose, cereali, bietole, olii usati); i biocombustibili liquidi e solidi per la produzione di energia elettrica e termica.

### SVILUPPO DELLE ENERGIE RINNOVABILI DERIVANTI DA BIOMASSA IN ITALIA

Il D.Lgs. 387/2003 [2] attua la direttiva europea 2001/77/CE per la promozione di energia elettrica derivante da fonti energetiche rinnovabili, regolando l'utilizzazione di energie rinnovabili da produzioni agricole-forestali per la produzione di energia elettrica, in particolare di impianti termoelettrici alimentati da biomasse legnose, biocombustibili liquidi (olio vegetale puro), biogas derivante da discarica e da depurazione, che possono richiedere la qualifica di IAFR (Impianti Alimentati da Fonti rinnovabili), propedeutica al rilascio dei Certificati Verdi (CV).

Tra le disposizioni di maggior rilievo introdotte dal decreto risulta essere l'incremento annuale di 0,35 punti percentuali, a partire dal 2004 fino al 2006, per la quota di energia rinnovabile da immettere nella rete elettrica pari al 2% del totale dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche non rinnovabili. In base ai dati riportati sul bollettino per l'anno 2005 "Incentivazione delle fonti rinnovabili" pubblicato dal Gestore dei Servizi Elettrici (GSE) nell'ottobre del 2006 [3], la quota obbligatoria di energia rinnovabile da immettere nel sistema elettrico è sensibilmente aumentata passando da 3,82 TWh nel 2004, a 4,30 TWh nel 2005, fino a 6 TWh nel 2006. La totalità dell'energia rinnovabile immessa nel sistema è stata

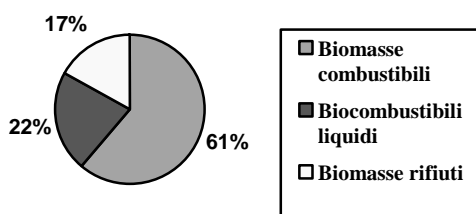
coperta dai Certificati Verdi emessi a favore degli Operatori con impianti che hanno ottenuto la qualificazione IAFR dal Gestore dei Servizi Elettrici, così come dai Certificati Verdi che il GSE stesso emette a proprio favore a fronte dell'energia prodotta dagli impianti Cip 6. In dettaglio per il 2005 si possono classificare i CV emessi secondo la fonte energetica (vedi Tabella 1)

Tabella 1: Classificazione dei CV emessi da GSE nel 2005 [1]

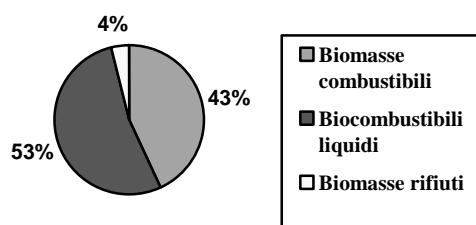
Fonte	Numero CV	%
Idraulica	33.904	38,44
Geotermica	11.217	12,72
Eolica	28.950	32,82
Biogas	5.028	5,7
Biomasse	6.165	6,99
Solare	21	0,02
Rifiuti	2.915	3,30
TOTALE	88.200	100,00

Per la fonte rinnovabile biomassa si può riportare una ulteriore suddivisione come sub-fonte energetica: biomasse combustibili (legno vergine, cippato, trucioli, sansa ecc.), biocombustibili liquidi (olio di palma, olio di colza, olio di girasole, biodiesel, ecc.), biomasse da rifiuti (individuate secondo la definizione del DM 5/05/2006 Allegato 1). In dettaglio è possibile valutare il numero di impianti, sia in esercizio che in fase di progetto, alimentati da biomassa, la loro potenza e la producibilità (vedi Figura 1).

Numero impianti	In esercizio	In progetto
Biomasse combustibili	22	12
Biocombustibili liquidi	8	15
Biomasse da rifiuti	6	1
TOTALE	36	28

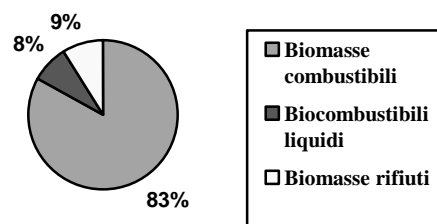


Numero impianti in esercizio

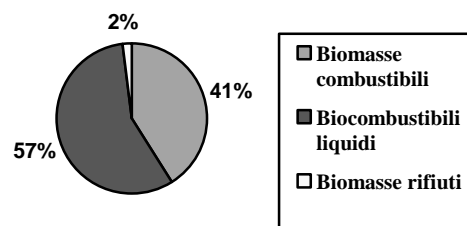


Numero impianti in progetto

Producibilità (GWh)	In esercizio	In progetto
Biomasse combustibili	1.070,2	671,8
Biocombustibili liquidi	107,3	956,7
Biomasse da rifiuti	120,4	29,9
TOTALE	1.297,8	1.658,4

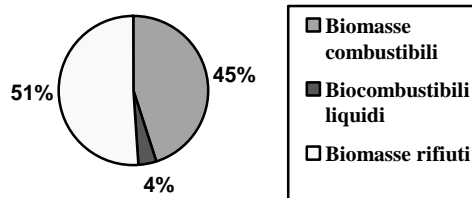


Producibilità impianti in esercizio

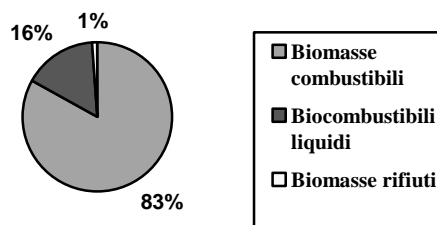


Producibilità impianti in progetto

Potenza (MW)	In esercizio	In progetto
Biomasse combustibili	308,3	662,3
Biocombustibili liquidi	28,6	129,9
Biomasse da rifiuti	346,6	4,3
TOTALE	683,5	796,6



Potenza impianti in esercizio



Potenza impianti in progetto

Figura 1: Impianti a biomassa qualificati al 30 giugno 2006 (Fonte GSE)

Analizzando i valori sopra riportati si può evidenziare come siano le biomasse di origine agricola e forestale quelle con un maggior sviluppo, sia in termini di numero di impianti presenti in Italia, che di producibilità in GWh. In dettaglio, notevole è l'incidenza che stanno assumendo i biocombustibili liquidi, i quali rappresentano in termini di producibilità il 57%, per impianti in fase di progetto, del totale dell'energia rinnovabile da biomassa.

Il grande sviluppo della produzione di energia a partire da biocombustibili liquidi, in particolare da olio vegetale puro, è dovuto al crescente interesse da parte dell'imprenditore agricolo verso la produzione di energia, si sono infatti sviluppate filiere innovative in cui l'agricoltore da semplice utente si è trasformato in produttore di energia elettrica. Questo sviluppo è stato possibile grazie alle recenti disposizioni di legge che mettono in primo piano l'importanza dell'autoproduzione di energia elettrica da parte dell'agricoltore, nel Dlgs 2/2006 "Interventi urgenti per i settori dell'agricoltura, dell'agro-industria, e della pesca, nonché in materia di fiscalità di impresa", le differenti forme di energia rinnovabile prodotte in ambito agricolo sono riconosciute prodotto agricolo e come tali possono contribuire alla costituzione della produzione lorda vendibile aziendale con lo stesso trattamento che caratterizza le produzioni tradizionali

Un ulteriore contributo allo sviluppo della produzione di energia elettrica a partire da biocombustibili liquidi è arrivata dalla Legge del 27 dicembre 2006 n. 296 "Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello stato" (Finanziaria 2007) [4] che mette in risalto l'utilizzo, a fini energetici, dell'olio vegetale puro, fornendo una serie di incentivazioni sia per l'olio utilizzato per autoconsumo nella azienda agricola, che proveniente da contratti di coltivazione, quali contratti quadro e intese di filiera regolati dal decreto legislativo 27 maggio 2005 n. 102

In dettaglio si riportano i commi della finanziaria relativi all'utilizzazione energetica dell'olio vegetale puro:

*Comma 369. Nella legge 23 dicembre 2005, n. 266, all'articolo 1, il comma 423 è sostituito dal seguente: "423. Ferme restando le disposizioni tributarie in materia di accisa, la produzione e la cessione di energia elettrica e calorica da fonti rinnovabili agroforestali e fotovoltaiche nonché di carburanti ottenuti da produzioni vegetali provenienti prevalentemente dal fondo e di prodotti chimici derivanti da prodotti agricoli provenienti prevalentemente dal fondo effettuate dagli imprenditori agricoli, costituiscono attività connesse ai sensi dell'articolo 2135, terzo comma, del codice civile e si considerano produttive di reddito agrario".*

La precedenti leggi avevano già stabilito che la produzione e cessione di energia elettrica e calorica da fonti rinnovabili agroforestali e fotovoltaiche effettuata da imprenditori agricoli costituisce attività agricola connessa soggetta a reddito agrario. La nuova finanziaria aggiunge anche la produzione e cessione di carburanti ottenuti da produzioni vegetali e prodotti chimici derivanti da prodotti agricoli. Una utile precisazione per l'applicazione di questa norma riguarda i prodotti agricoli e le produzioni vegetali da utilizzare per gli scopi sopra indicati che devono provenire prevalentemente dal fondo agricolo, sciogliendo così le incertezze sulle interpretazioni attuative.

*comma 380. E' esentato dall'accisa, entro un importo massimo di 1 milione di euro per ogni anno a decorrere dall'anno 2007, l'impiego a fini energetici nel settore*

*agricolo, per autoconsumo nell'ambito dell'impresa singola o associata, dell'olio vegetale puro, come definito dall'allegato I, lettera l), del decreto legislativo 30 maggio 2005, n. 128.*

L'olio vegetale puro è ben definito nell'allegato I del D.Lgs. 128/2005 [5] come: "olio prodotto da piante oleaginose mediante pressione, estrazione o processi analoghi, greggio o raffinato ma chimicamente non modificato, qualora compatibile con il tipo di motore utilizzato e con i corrispondenti requisiti in materia di emissioni", ed è inserito nei prodotti considerati biocarburanti.

Le modalità di accesso all'agevolazione saranno definite entro trenta giorni dalla entrata in vigore della finanziaria mediante decreto del Ministro delle politiche agricole e forestali, d'intesa con il Ministro dell'economia e delle finanze.

*Comma 381. All'onere derivante dall'attuazione del comma 380, pari a un milione di euro per ciascuno degli anni 2007, 2008 e 2009, si provvede mediante corrispondente riduzione dell'autorizzazione di spesa di cui all'articolo 5, comma 3-ter, del decreto-legge 1° ottobre 2005, n. 202, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 novembre 2005, n. 244.*

Questo comma spiega la provenienza delle risorse finanziarie necessarie per l'attuazione del comma 380, mediante la riduzione di spesa dell'art 5 comma 3-ter del decreto legge 1 ottobre 2005 n. 202, "Misure urgenti per la prevenzione dell'influenza aviaria", è stato convertito con modificazioni dalla legge 30 novembre 2005 n.244 "Conversione in legge con modificazioni, del decreto legge 1 ottobre 2005 n.202, recante misure urgenti per la prevenzione dell'influenza aviaria".

L'art 5 comma 3-ter autorizza la spesa di 2 milioni di euro per l'anno 2006 e di 8 milioni di euro a decorrere dall'anno 2007 per l'attuazione di interventi urgenti nel settore agricolo a favore degli allevatori avicoli, delle imprese di macellazioni avicola e degli esercenti attività di commercio all'ingrosso di carne avicola.

*Comma 382. Entro sei mesi dalla data di entrata in vigore della presente legge, il Ministro dello sviluppo economico, d'intesa con il Ministro delle politiche agricole alimentari e forestali, provvede, con proprio decreto, alla revisione della disciplina dei certificati verdi di cui all'articolo 11 del decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79, e successive modificazioni, finalizzata ai seguenti obiettivi:*

*a) incentivare l'impiego a fini energetici delle materie prime provenienti dai contratti di coltivazione di cui all'articolo 90 del regolamento (CE) n. 1782/2003 del Consiglio, del 29 settembre 2003;*

Il Regolamento del Consiglio (CE) n. 1782/2003 del 29 settembre 2003 stabilisce norme comuni relative ai regimi di sostegno diretto nell'ambito della politica agricola comune e istituisce taluni regimi di sostegno a favore degli agricoltori e che modifica i regolamenti (CEE) n. 2019/93, (CE) n. 1452/2001, (CE) n. 1453/2001, (CE) n.1454/2001, (CE) n. 1868/94, (CE) n. 1251/1999, (CE) n. 1254/1999, (CE) n. 1673/2000, (CEE) n. 2358/71 e (CE) n. 2529/2001. L'art. 90 fa riferimento agli aiuti concessi alle colture energetiche: "l'aiuto è concesso soltanto per le superfici la cui produzione forma oggetto di contratto stipulato tra l'agricoltore e l'industria di trasformazione o di contratto tra l'agricoltore e il collettore, salvo nel caso in cui la trasformazione sia effettuata dall'agricoltore stesso nell'azienda"

*b) incentivare l'impiego a fini energetici di prodotti e materiali residui provenienti dall'agricoltura, dalla zootecnia,*

## UTILIZZAZIONE ENERGETICA DELL'OLIO VEGETALE PURO

Per olio vegetale puro si intende olio prodotto a partire da piante oleaginose mediante pressione o estrazione, può essere utilizzato sia grezzo, semplicemente spremuto e filtrato, o raffinato. La pianta oleaginosa più diffusa sul territorio italiano è il girasole, una pianta erbacea annuale con un ciclo colturale di 110-145 giorni. La resa in semi è di 2,3-2,5 t/ha che può notevolmente aumentare se la coltura è irrigua. La raccolta avviene 15-20 giorni dopo la maturazione (da metà agosto a metà settembre), mediante trebbiatura, i residui di coltivazione sono lasciati in campo dato l'elevato potere fertilizzante.

Il bilancio energetico della coltura è di circa 8.500 – 10.700 MJ per ettaro di girasole coltivato, la maggior parte del consumo energetico deriva dalla fertilizzazione circa 5.000 MJ/ha [6]

Un biocombustibile è una sorgente di energia rinnovabile ma necessita di un consumo di energia fossile per la produzione. Per verificare la valenza ambientale ed energetica di un biocombustibile si utilizza solitamente un parametro, la ratio energetica che indica il rapporto tra la produzione dell'energia rinnovabile e il consumo di energia, solitamente fossile, necessaria per la realizzazione di tutta la filiera. Se la ratio è superiore a 1, la produzione di energia rinnovabile è superiore al consumo di energia fossile.

Gli ordini di grandezza della ratio energetica per l'olio di girasole è di 3 – 4,5.

Le ratio energetiche dei carburanti fossili sono inferiori all'unità, si può interpretare il bilancio energetico nel modo seguente. Per esempio, per una ratio energetica di 3 per l'olio vegetale e di 0,9 per il gasolio e per una produzione di 100 "unità" energetiche di combustibili, si avrà un consumo di 30 unità di energia fossile nel caso dell'olio vegetale e di 111 nel caso del gasolio.

Per quello che concerne l'emissione di CO<sub>2</sub>, principale gas responsabile dell'effetto serra, si può considerare che la quantità emessa durante l'utilizzazione dei biocombustibili è identica alla quantità di CO<sub>2</sub> che la pianta assorbe durante la sua crescita. Il ciclo della CO<sub>2</sub> è dunque in pari. Tuttavia durante la produzione dei biocombustibili (utilizzo di energia fossile durante la fase agricola, fase industriale di trasformazione, trasporto etc.) vengono emessi gas responsabili dell'effetto serra. Un combustibile fossile, estratto dal petrolio, emette CO<sub>2</sub> sia durante la produzione che durante l'utilizzo (ciclo aperto). In generale, il risparmio in termini di gas serra è dell'ordine di 2 – 3 tonnellate di CO<sub>2</sub> per TEP di biocombustibile utilizzato.

Oltre alla CO<sub>2</sub>, le altre emissioni legate all'utilizzazione energetica dei biocombustibili sono abbastanza variabili, in generale, l'utilizzo del olio vegetale permette la riduzione delle emissioni di monossido di carbonio, di idrocarburi, di ossidi di zolfo; per contro le emissioni di ossido di azoto sono meno favorevoli rispetto ai combustibili convenzionali.

I biocombustibili sono prodotti da materie prime agricole, caratterizzate da metodi colturali volti alla diminuzione della quantità di pesticidi e fertilizzanti utilizzati. L'impatto ambientale globale dei biocombustibili può essere valutato mediante l'analisi del ciclo di vita, che confronta le filiere equivalenti, considerando tutte le fasi della filiera, dall'estrazione della materia prima fino all'utilizzazione finale, senza dimenticare il valore dei sottoprodotti derivanti dalla produzione che danno sempre un apporto positivo al ciclo di vita.

dalle attività forestali e di trasformazione alimentare, nell'ambito di progetti rivolti a favorire la formazione di distretti locali agro-energetici;

c) incentivare l'impiego a fini energetici di materie prime provenienti da pratiche di coltivazione a basso consumo energetico e in grado di conservare o integrare il contenuto di carbonio nel suolo.

Verrà rivista l'attuale disciplina dei certificati verdi e dovrà essere finalizzata ad incentivare l'impiego a fini energetici di materie prime provenienti da contratti di coltivazione, di prodotti e residui provenienti dall'agricoltura, dalla zootecnia, delle attività forestali e di trasformazione alimentare, nell'ambito di progetti rivolti a favorire la formazione di distretti locali agroenergetici, da materie prime provenienti da pratiche di coltivazione a basso consumo energetico e in grado di conservare o integrare il contenuto di carbonio nel suolo.

Per i certificati verdi di tipo "agricolo" non si applicherà la soglia minima di 50.000 kWh prodotti, quindi tutta l'energia elettrica prodotta anche per quantità inferiori a questo tetto potrà beneficiare dei CV.

*Comma 383. Ai certificati verdi riconosciuti ai produttori di energia ai sensi del comma 382, non si applicano le disposizioni di cui all'articolo 1, comma 87, della legge 23 agosto 2004, n. 239.*

L'art 1 comma 87 della legge 23 agosto 2004 n.239 " Riordino del settore energetico, nonché delega al governo per il riassetto delle disposizioni vigenti in materia di energia", stabilisce il valore dei certificati verdi ai sensi del decreto legislativo 16 marzo 1999 n. 79, in 0,05 GWh o multipli di questa grandezza.

*384. Il numero 122) della tabella A, parte III, allegata al decreto del Presidente della Repubblica 26 ottobre 1972, n. 633, è sostituito dal seguente:*

*"122) prestazioni di servizi e forniture di apparecchiature e materiali relativi alla fornitura di energia termica per uso domestico attraverso reti pubbliche di teleriscaldamento o nell'ambito del contratto servizio energia, come definito nel decreto interministeriale di cui all'articolo 11, comma 1, del regolamento di cui al decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, e successive modificazioni; sono incluse le forniture di energia prodotta da fonti rinnovabili o da impianti di cogenerazione ad alto rendimento; alle forniture di energia da altre fonti, sotto qualsiasi forma, si applica l'aliquota ordinaria".*

I beni e i servizi elencati nel comma sono tutti soggetti ad aliquota IVA del 10%.

Risulta quindi evidente l'interesse da parte del governo allo sviluppo delle energie rinnovabili derivanti dal settore agricolo, si intende infatti, oltre che incentivare l'uso su piccola e grande scala dell'olio vegetale puro per la produzione energetica, aumentare la produzione di colture energetiche alla base della produzione dei biocombustibili liquidi. In questo modo le aziende agricole assumono un nuovo ruolo, diventando autosufficienti da un punto di vista energetico e produttrici di combustibili rinnovabili.

Un ulteriore sviluppo alla produzione agricola di olio vegetale deriva dalla produzione di biolubrificanti di origine vegetale che possono richiedere il marchio di comunitario di qualità ecologica.

La filiera dei biocombustibili è migliore di quella dei combustibili fossili per quel che concerne il bilancio energetico, l'emissione dei gas responsabili dell'effetto serra, la biodegradabilità.

Per quanto riguarda l'utilizzazione energetica dell'olio vegetale puro, si possono individuare due tipologie di filiere:

- Filiere locali che nascono e si sviluppano interamente all'interno dell'azienda agricola
- Filiere in cui il settore agricolo è affiancato da quello industriale, mediante contratti quadro o intese di filiere, come richiesto dalla Legge del 27 dicembre 2006 n. 296 (Finanziaria 2007).

Qualunque sia il tipo di filiera da analizzare, questa può essere suddivisa in 3 fasi:

- Fase di campo, produzione del seme
- Fase di trasformazione, produzione dell'olio mediante spremitura del seme, che può avvenire o attraverso impianti modulari di spremitura presenti nell'azienda agricola, o in oleifici industriali
- Fase di utilizzazione, l'olio viene impiegato in gruppi elettrogeni per la produzione di energia elettrica, o in gruppi cogenerativi dove si ha la produzione combinata di energia elettrica e termica.

Per quanto riguarda la fase di utilizzazione dell'olio la normativa italiana fissa le specifiche tecniche dell'olio utilizzato come combustibile per la produzione di energia, mediante la Norma UNI/TS11163. La specifica tecnica definisce la classificazione e le specifiche degli oli vegetali e dei loro principali sottoprodotti e derivati ai fini del loro utilizzo quali combustibili in motori endotermici per la produzione di energia elettrica/termica con potenza termica nominale complessiva installata  $> 3 \text{ MW}_t$ . Non esistono normative italiane per l'utilizzo dell'olio vegetale in motori endotermici con potenza  $< 3 \text{ MW}_t$ .

### Filieri locali

L'innovazione che caratterizza le filiere locali per la produzione di energia elettrica, è legata al nuovo ruolo che assume l'agricoltore, che da utente si propone come produttore di energia elettrica. Nell'azienda agricola, a partire dalle colture energetiche, si produce olio vegetale che viene utilizzato per la produzione di energia elettrica necessaria all'autoconsumo e vendibile al gestore nazionale della rete elettrica, o per l'alimentazione di gruppi cogenerativi che permettono una produzione combinata di energia elettrica e termica.

Sul mercato sono infatti disponibili presse modulari per la produzione di olio a partire da piante oleaginose, le presse effettuano una spremitura continua a freddo dei semi e una filtrazione dell'olio, si ottiene in questo modo olio grezzo che può essere direttamente utilizzato per la produzione di energia, o per la produzione di biodiesel. Come sottoprodotto della spremitura dei semi si ha il pannello proteico, che può essere ottenuto come pellet spezzato del diametro di 8-10 mm da utilizzare per il riscaldamento domestico.

Considerando un generico bilancio di massa della fase agricola e di produzione dell'olio, si ha:

- 1 ha di terreno coltivato
- 2,4 t/anno di semi
- 768 kg/anno considerando una resa della spremitrice del 32%
- 1.632 kg/anno di pannello

Per quanto riguarda la fase di utilizzazione le esperienze Europee, relative all'impiego di oli grezzi per la produzione di energia elettrica, indicano la possibilità di un loro utilizzo in piccoli Gruppi Elettrogeni (GE) azionati da motori diesel.

In Italia, l'industria motoristica, dato l'elevato interesse che sta nascendo nei confronti di questa tecnologia, comincia a produrre GE di varie potenze (da pochi kW fino a 1MW), tradizionalmente alimentati a gasolio, modificati per funzionare anche ad olio vegetale puro per potenze che variano da 6 a 1.400 kW con consumi specifici di 245-226 g/kWh, i rendimenti oscillano tra il 34%, e il 36%.

Per il funzionamento del GE con olio vegetale grezzo è necessario, per le caratteristiche fisiche del biocombustibile, l'introduzione di uno scambiatore di calore a piastre sulla mandata, con la funzione di preriscaldare l'olio, migliorandone la fluidità, riducendo la viscosità. Sempre per la peculiarità del biocombustibile e per favorire il funzionamento del GE si suggerisce di avviare ed arrestare con gasolio, il GSE permette infatti un consumo di gasolio pari al 5% del biocombustibile consumato, nel pagamento dell'importo relativo ai Certificati Verdi (CV) [7].

La scelta dell'utilizzo dell'olio in un gruppo elettrogeno o in un gruppo cogenerativo dipende, dalle dimensioni dell'azienda, considerando un consumo specifico dell'olio pari a 0,25 kg/kWh, si ha che da 1 ettaro di terreno coltivato si possono produrre 3072 kWh elettrici annui:

- a partire da 10 ha si possono produrre 30.720 kWh<sub>elettrici</sub>, considerando un tempo di funzionamento dell'impianto pari a 7.200 ore è possibile installare un gruppo elettrogeno di 4 kW di potenza;
- a partire da 250 ha si possono produrre 768.000 kWh<sub>elettrici</sub>, considerando un tempo di funzionamento dell'impianto pari a 7.200 ore è possibile installare un gruppo elettrogeno, o cogenerativo di 100 kW di potenza elettrica;
- a partire da 500 ha si possono produrre 1.536.000 kWh<sub>elettrici</sub>, considerando un tempo di funzionamento dell'impianto pari a 7.200 ore è possibile installare un gruppo elettrogeno, o cogenerativo da 200 kW di potenza elettrica.

I gruppi cogenerativi si utilizzano per potenze superiori ai 100 kW, risultano infatti economicamente convenienti da questa taglia in poi, inoltre l'utilizzo della cogenerazione è consigliato quando è possibile sfruttare tutta l'energia termica prodotta, direttamente o mediante assorbimento per la produzione del freddo si parla in questi casi di trigenerazione.

### Filieri agricolo-industriali

Nelle filiere agricolo-industriali, a differenza delle filiere locali, l'azienda agricola si occupa della sola produzione dei semi oleosi, mentre la fase di trasformazione è affidata ad un oleificio. Il procedimento di spremitura implica in questo caso un trattamento meccanico e/o chimico (solitamente si utilizza l'esano come solvente). Da tali trattamenti si ricavano dei sottoprodotti utilizzabili per l'alimentazione del bestiame; in particolare, dal solo trattamento di spremitura si ottiene il pannello, che presenta un maggior contenuto di sostanze grasse, e dal trattamento chimico (successivo a quello fisico) le farine, che contengono solo proteine e risultano, quindi, un alimento non completo, ma sono più facili da conservare.

Considerando un generico bilancio di massa della fase agricola e di produzione dell'olio si ha:

- 1ha di terreno coltivato

- 2,4 t/anno di semi
- 1.008 kg/anno considerando una resa del 42%, per la spremitura meccanica
- 1.392 kg/anno di pannello

A differenza della semplice spremitura a freddo effettuata in azienda, con la lavorazione dei semi negli oleifici, si ha una produzione superiore di sottoprodotti, che incidono nella valutazione sia del bilancio energetico che economico della filiera:

- *gusci e tegumenti* costituiscono il primo sottoprodotto della lavorazione dei semi oleosi. E' noto che soia e colza hanno un tegumento che rappresenta il 10-15% del seme, mentre il guscio del seme di girasole varia dal 20 al 50%. Dato che i gusci e i tegumenti sono costituiti soprattutto da materiali cellulósici e ligninici, essi si prestano a parecchie utilizzazioni: preparazione di pellettati da incorporare nei mangimi per ruminanti e conigli, preparazione di pannelli e pressati per imballaggi, ottenimento di biomasse microbiche previa idrolisi acida o enzimatica della cellulosa, produzione di furfurolo per distillazione in ambiente acido, produzione di energia a mezzo di processi fisico-chimici e microbiologici;
- *panello*, formato dai residui del seme dopo la spremitura meccanica. Ha un contenuto di sostanza grassa superiore all'8%, arriva anche al 10-15%; esso contiene inoltre acidi grassi, alcune vitamine liposolubili ed elevato valore energetico. Presenta lo svantaggio della difficile conservazione dovuta alla potenziale formazione di perossidi (irrancidimento);
- *farina di estrazione*, residuo dei trattamenti chimici di estrazione. Ha un contenuto in materia grassa molto basso (1-2%), dovuto al processo di estrazione, molto più efficiente di quello meccanico. Non è un alimento completo ma ha il vantaggio di conservarsi bene nel tempo.

L'olio vegetale prodotto, se utilizzato in impianti cogenerativi di potenza superiore ai 3 MW, deve avere caratteristiche corrispondenti a quelle previste dalla norma UNI/TS11163 che fissa specifiche riguardanti la densità dell'olio ( $\text{kg/m}^3$ ), il punto di infiammabilità ( $^{\circ}\text{C}$ ), Potere Calorifico Inferiore (P.C.I.) ( $\text{MJ/kg}$ ), viscosità cinematica a  $40^{\circ}\text{C}$  ( $\text{mm}^2/\text{s}$ ).

Le incentivazioni previste dalla finanziaria 2007, per impianti alimentati ad olio vegetale puro, prevedono che tra il reparto agricolo ed industriale siano stipulati contratti quadro o intese di filiera regolati dal decreto legislativo 27 maggio 2005 n.102.

## CONCLUSIONI

Per raggiungere gli obiettivi, fissati nel Protocollo di Kyoto, entrato in vigore il 16 febbraio 2005, la Commissione Europea ha adottato, nel dicembre 2005, un Piano di azione volto a

sviluppare l'utilizzazione delle energie rinnovabili agricole e forestali, in modo da ridurre le emissioni di gas serra, proteggere l'occupazione delle zone rurali e limitare la dipendenza dell'Europa riguardo alle importazioni di energia.

Con la realizzazione del Piano l'Europa vuole porre fine alla dipendenza dai combustibili fossili e l'utilizzazione energetica della biomassa risulta essere una delle principali soluzioni possibili. Occorre, quindi, sviluppare a livello europeo e nazionale delle misure economicamente efficienti a favore della biomassa al fine di:

- ✓ trarre il massimo profitto dall'innovazione a livello nazionale e locale;
- ✓ offrire chiare prospettive di sviluppo sia agli imprenditori agricoli che al mondo industriale;
- ✓ incentivare lo sviluppo tecnologico legato all'utilizzazione energetica della biomassa.

Le misure previste nella Finanziaria 2007 sono tali da garantire il raggiungimento degli obiettivi sopra indicati, soprattutto per quanto riguarda lo sviluppo delle filiere energetiche dell'olio vegetale puro, fornendo supporti economici sia alla produzione delle colture energetiche che all'utilizzo finale dell'olio.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Commissione delle comunità Europee, comunicazione della Commissione, Piano d'azione della biomassa COM(2005) 628 definitivo, Bruxelles 07.12.2005.
2. Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387, Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità (pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 25 del 31 gennaio 2004 – Supplemento Ordinario n. 17).
3. GSE (Gestore Servizi Elettrici), Incentivazione delle fonti rinnovabili, Bollettino 2005, Roma ottobre 2006.
4. Legge 27 dicembre 2006 n. 296, Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello stato (pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 299 del 27 dicembre 2006– Supplemento Ordinario n. 244).
5. Decreto legislativo 30 maggio 2005 n. 128, Attuazione della direttiva 2003/30/CE relativa alla promozione dell'uso dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti (pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 160 del 12 luglio 2005).
6. CTI (Comitato Termotecnica Italiano), sezione Energia e Ambiente, Aspetti energetico ambientali coltivazione delle colture oleaginose.
7. G. Riva, E. Foppa Petretti, G. Toscano, V. Scrosta, R. Cerioni, F. Fiaschini, D. Duca, A. Bordoni (2005), Sintesi dei risultati della ricerca condotta dalla Regione Marche nell'ambito del progetto interregionale "Filiera biocombustibili dal girasole" PROBIO.

## IMPIEGO DELL'ALGA VERDE *CHLAMYDOMONAS REINHARDTII* PER LA PRODUZIONE DI IDROGENO

Ines Montecarlo<sup>1</sup>, Naida Corsi<sup>2</sup>, Margherita Giuliobello<sup>2</sup>, Federico Rossi<sup>3</sup>, Elio Cenci<sup>1</sup>, Francesco Bistoni<sup>1</sup>, Antonella Mencacci<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sezione di Microbiologia, Dipartimento di Medicina Sperimentale e Scienze Biochimiche, Università degli Studi di Perugia, Via del Giochetto, 06122 Perugia.

<sup>2</sup>IPASS-Consortio Ingegneria Per l'Ambiente e lo Sviluppo Sostenibile, Via G. Guerra 23, 06127 Perugia.

<sup>3</sup>Sezione di Fisica Tecnica, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia, Via Duranti 67, 06125 Perugia.

### SOMMARIO

La produzione fotobiologica di idrogeno da parte dell'alga verde *Chlamydomonas reinhardtii* ha sviluppato notevole interesse nel campo della ricerca sulle energie rinnovabili. La quantità di idrogeno prodotto da quest'alga dipende da vari fattori quali la composizione del terreno di coltura, l'esposizione alla luce solare, la presenza di ossigeno, etc.

Nel nostro studio stiamo sperimentando le migliori condizioni di coltura dell'alga, al fine di ottenere una produzione ottimale di idrogeno. La sperimentazione relativa alla coltivazione di *C. reinhardtii* in terreni con diversa composizione chimica ha dimostrato che, in accordo con la letteratura specifica, la più elevata produzione di idrogeno si ottiene in terreno Tris-acetate phosphate (TAP) privo di zolfo e solfati. Sono stati condotti due esperimenti sottoponendo le colture a diverse condizioni di illuminamento. Nel primo esperimento sono stati utilizzati due tipi di lampade fluorescenti a vapori di mercurio con diverse temperature di colore (rispettivamente 5.600 e 2.700 K), e una lampada allo xeno con una temperatura di colore di 6.800 K. Nel secondo esperimento sono state impiegate due delle lampade già utilizzate nel primo esperimento (una lampada fluorescente a vapori di mercurio con una temperatura di colore di 2.700 K e una lampada allo xeno con una temperatura di colore di 6.800 K). Inoltre alcuni campioni sono stati sottoposti ad illuminazione naturale. Lo scopo è stato quello di stabilire l'effetto delle diverse condizioni di illuminamento sulla produzione di idrogeno da parte delle colture.

### INTRODUZIONE

L'utilizzo indiscriminato di fonti non rinnovabili comporta sia il problema di garantire la sicurezza dell'approvvigionamento di energia che quello di arginare l'impatto ambientale relativo a tale uso. Da qui la necessità di dover ricorrere a fonti di energia rinnovabili ovvero forme di energia che si rigenerano rapidamente mediante processi naturali. Una delle possibili alternative ai combustibili fossili è rappresentata dall'idrogeno in quanto fonte di energia pulita e rinnovabile. L'affermarsi di questa tecnologia, una volta superati i suoi limiti intrinseci, è sicuramente una delle più affascinanti e stimolanti prospettive nell'ottica di uno sviluppo ambientale e sociale realmente sostenibile.

Lo sviluppo di una economia fondata sull'idrogeno richiede quindi l'implementazione di metodi di produzione, economicamente e tecnicamente competitivi. La produzione di idrogeno a partire da molecole inorganiche da parte di microrganismi rappresenta una attraente e ambiziosa possibilità. Allo stato attuale delle conoscenze, gli studi indicano per tale processo un livello di efficienza di conversione energetica (rapporto tra energia prodotta dall'idrogeno ottenuto e energia impiegata) compreso tra il 5% e il 10%. Nonostante il rendimento energetico sia troppo basso per un'applicazione su larga scala in termini economicamente vantaggiosi, tale tecnologia rappresenta un'interessante alternativa ai sistemi di conversione che impiegano fonti energetiche tradizionali, anche in considerazione dei notevoli margini di miglioramento offerti dai sistemi biologici.

Il lavoro sperimentale descritto nel presente articolo ha lo scopo di individuare le condizioni ottimali di coltivazione dell'alga verde *Chlamydomonas reinhardtii*, finalizzate alla produzione d'idrogeno, al fine di progettare un fotobioreattore ad elevata efficienza per la produzione biologica di tale gas.

### MATERIALI E METODI

#### Coltivazione di *C. reinhardtii*.

Le colture di *C. reinhardtii* ( $7.5 \times 10^4$  cellule/ml terreno di coltura) sono state inoculate all'interno di bottiglie graduate da 500 ml in vetro borosilicato (figura 1).



Figura 1: Bottiglia graduata

Le bottiglie sono dotate di tappo in Politereftalato di Butile (PBT) resistente fino a 180 °C con guarnizione in Politetra Fluoroetilene (PTFE). Ogni bottiglia presenta 5 attacchi con tappi forati dotati di setto poroso in butile/teflon.

Sono stati effettuati due diversi esperimenti in cui le colture sono state sottoposte a diverse condizioni di illuminazione (naturale e artificiale) ed è stata determinata la produzione di idrogeno a diversi tempi di coltura. A tal fine sono state allestite differenti postazioni, ognuna costituita da una scatola con pareti riflettenti rivestite in alluminio, all'interno delle quali le bottiglie contenenti le colture sono state posizionate (Figura 2).



Figura 2: Postazioni di prova

### Misurazione dell'idrogeno prodotto

Per la rilevazione dei gas contenuti nelle bottiglie è stato utilizzato un gascromatografo con rilevatore TCD in grado di misurare la percentuale in termini di concentrazione in volume di idrogeno (ma anche dell'azoto, dell'ossigeno e dell'anidride carbonica) presente all'interno dei contenitori di vetro durante l'intero periodo di durata della prova.

In ognuno dei due esperimenti effettuati la prima di  $n$  misurazioni è stata condotta al momento dell'inoculo ( $t_0 =$  tempo zero).

Con  $T$  è indicato il periodo di durata totale della prova e con  $T_i$  l'intervallo di tempo tra una misurazione e l'altra con  $i = 1 \dots n-1$

Indicando con  $x_i$  la percentuale in volume di idrogeno rilevata dallo strumento e con  $v_i$  il volume prelevato dal contenitore nel corso di ogni misurazione, il volume totale di idrogeno prodotto nel corso della prova  $V_{H_2}$  sarà dato da:

$$V_{H_2 \text{ prodotto}} = \sum_{i=1}^{n-1} x_i \cdot v_i + V_{H_2 \text{ prima del prelievo } i} \quad (1)$$

in cui:

$$V_{H_2 \text{ prima del prelievo } i} = \sum_{i=1}^{n-1} x_i \cdot V_{\text{libero}} v_i \quad (2)$$

### Condizioni di coltura nel primo esperimento

Nel primo studio *C. reinhardtii* è stata coltivata parallelamente in terreni con diversa composizione chimica: Tris-acetate-phosphate (TAP) con zolfo e TAP privo di zolfo e solfati ( $15 \times 10^6$  *C. reinhardtii* in 200 ml di terreno TAP/ bottiglia). Le

colture sono state esposte contemporaneamente a diverse temperature di colore mediante l'impiego di due tipi di lampade fluorescenti a vapori di mercurio con temperature di colore di 5600 e 2700 K, e una lampada allo xeno con una temperatura di colore di 6800 K. (Tabella 1)

Tabella1. Caratteristiche delle lampade installate nelle tre postazioni

TIPO DI LAMPADA	Lampada fluorescente a vapori di mercurio (765 BASIC OSRAM)	Lampada fluorescente a vapori di mercurio (865 LUMINUX OSRAM)	Lampada allo xeno
TONALITÀ DI LUCE	Luce bianca diurna DAYLIGHT	Luce bianca tono caldo WARM WHITE	ULTRA WHITE
POTENZA NOMINALE (W)	3x30 =90	3x30 =90	35
Indice di resa cromatica $R_a$	70...79	80...89	>90
Flusso luminoso $\Phi(lm)$	1900 (63 lm/W)	2400 (80 lm/W)	2500 (70 lm/W)
Lunghezza x diametro (mm)	895x26	895x26	40x7
TEMP. DI COLORE $T_c$ (K)	6500 (valore misurato 5600)	3000 (valore misurato 2700)	8000 (valore misurato 6800)
ILLUMIN. $E_v$ (lux)	12600	15300	3400

Per la sperimentazione svolta sono stati preparati 6 campioni codificati in base al tipo di terreno e alla lampada utilizzata.

La codifica dei campioni è riportata nella Tabella 2

Tabella 2. Codifica dei campioni

Tipologie di colture	Lampade - $T_c$ (K)		
	2700	5600	6800
<i>C. reinhardtii</i> in terreno senza zolfo	A	B	C
<i>C. reinhardtii</i> in terreno con zolfo	AS	BS	CS

### Condizioni di coltura nel secondo esperimento

Colture di *C. reinhardtii* in terreno TAP senza zolfo sono state sottoposte ad illuminazione continua con lampada fluorescente con  $T_c = 2700$  K e lampada allo xeno e parallelamente le stesse colture sono state esposte alla sola luce del sole.

Sono stati preparati 6 campioni codificati in base al tipo di terreno e alla lampada della postazione di prova in cui è stato posizionato il campione.

La codifica dei campioni è riportata nella Tabella 3

Tabella 3. Codifica dei campioni

Tipologia di coltura	Tipo di illuminazione		
	Lampada A fluorescente T <sub>c</sub> =2700 K	Lampada C allo Xeno T <sub>c</sub> =6.800 K	Luce solare
15 x 10 <sup>6</sup> <i>C. reinhardtii</i> /200 ml TAP	1		
15 x 10 <sup>6</sup> <i>C. reinhardtii</i> /200 ml TAP		2	
15 x 10 <sup>6</sup> <i>C. reinhardtii</i> /200 ml TAP			3
30 x 10 <sup>6</sup> <i>C. reinhardtii</i> /400 ml TAP	4		
30 x 10 <sup>6</sup> <i>C. reinhardtii</i> /400 ml TAP		5	
30 x 10 <sup>6</sup> <i>C. reinhardtii</i> /400 ml TAP			6

## RISULTATI

### Primo esperimento

I campioni che hanno dato i migliori risultati in termini di quantità di idrogeno prodotto sono quelli delle colture A e C ovvero *C. reinhardtii* coltivata in terreno senza zolfo sottoposto ad illuminazione continua con lampada fluorescente con T<sub>c</sub>=2700 K (coltura A) e con lampada allo xeno con T<sub>c</sub>=6800K (coltura C)

In particolare (Figura 3) per il campione A la quantità totale di idrogeno prodotto è stata crescente nel tempo fino all'undicesimo giorno dall'inoculo in corrispondenza del quale è stato raggiunto il valore massimo di 164 mmol. Dall'undicesimo al ventiduesimo giorno dall'inoculo si è registrato un andamento decrescente e la quantità totale di idrogeno è scesa fino a 96 mmol. Dal giorno 22 al giorno 32 si è registrato un andamento oscillante con valore massimo di idrogeno prodotto di circa 120 mmol.

Per il campione C la quantità totale di idrogeno prodotto è stata crescente nel tempo fino al ventesimo giorno dall'inoculo in corrispondenza del quale è stato raggiunto il valore massimo di 177 mmol. Dal ventesimo al ventiduesimo giorno si è registrato un andamento decrescente e la quantità totale di idrogeno è scesa fino a 105 mmol. Dal giorno 22 al giorno 32 si è registrato un andamento oscillante, con valore massimo di idrogeno prodotto di circa 132 mmol.

Per quanto riguarda i campioni delle colture in terreno con zolfo (AS, BS e CS) gli andamenti della quantità totale di idrogeno prodotto erano oscillanti durante i primi 11 giorni dall'inoculo (Figura 4). Tuttavia è durante tale periodo che sono stati raggiunti i valori massimi per i campioni AS (cultura di *C. reinhardtii* in terreno con zolfo sottoposto ad illuminazione continua con lampada fluorescente con T<sub>c</sub>=2700 K) e BS (cultura di *C. reinhardtii* in terreno con zolfo sottoposto ad illuminazione continua con lampada fluorescente

con T<sub>c</sub>= 5600 K). Tali valori sono pari a 15 mmol per il campione AS e 7 mmol per il campione BS.

Il campione CS (cultura di *C. reinhardtii* in terreno con zolfo sottoposto ad illuminazione continua con lampada allo xeno) ha presentato un andamento crescente nel tempo durante tutto il periodo di durata della prova raggiungendo un valore massimo di 7,6 mmol dopo 27 giorni dall' inoculo.

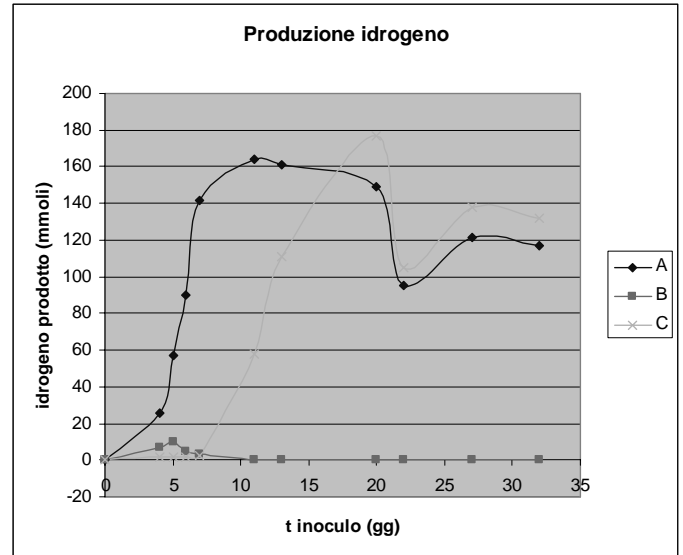


Figura 3: Quantità totale di idrogeno prodotto dalle colture di *C. reinhardtii* in 200 ml di terreno TAP senza zolfo in funzione del tempo.

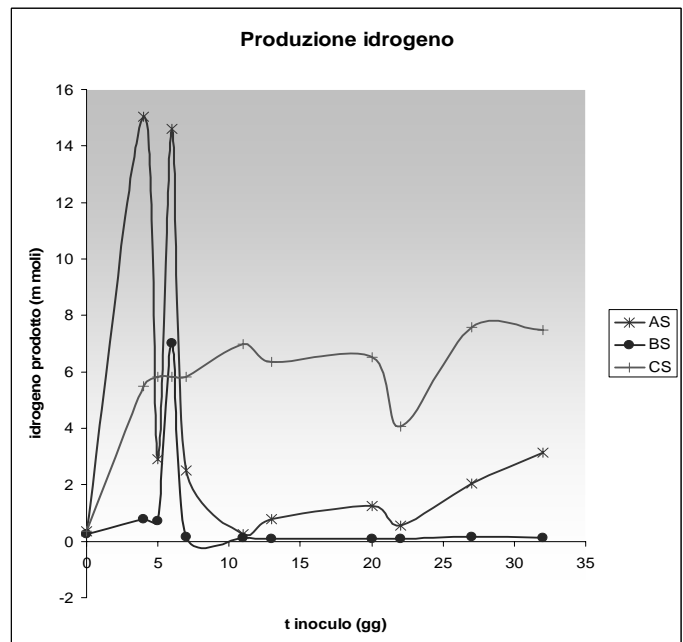


Figura 4: Andamento della quantità totale di idrogeno prodotto dalle colture coltivate in 200 ml di terreno TAP senza zolfo in funzione del tempo di inoculo

I risultati ottenuti permettono di trarre le seguenti conclusioni:

- 1) a parità di condizioni di illuminazione il terreno di crescita migliore è risultato essere quello senza zolfo;
- 2) le condizioni di luce più favorevoli per una maggior produzione di idrogeno da parte delle colture sono state

ottenute con la lampada fluorescente con temperatura di colore di 2700 K e con la lampada allo xeno. Con quest'ultima è stata registrata la massima produzione di idrogeno (177 mmol) dopo 20 giorni dall'inoculo.

## Secondo esperimento

Le colture di *C. reinhardtii* sottoposte a lampada fluorescente e lampada allo xeno hanno permesso di ottenere andamenti e valori di idrogeno prodotto abbastanza simili e sicuramente migliori rispetto alle condizioni di illuminazione naturale.

In particolare i risultati più soddisfacenti sono stati raggiunti con il campione 1 (*C. reinhardtii* sottoposta a illuminazione artificiale con lampada fluorescente con  $T_c = 2700K$ ), in cui la quantità totale di idrogeno prodotto è stata crescente nel tempo fino all'undicesimo giorno dall'inoculo in corrispondenza del quale è stato raggiunto il valore massimo di 116 mmol (Figura 5). Dall'undicesimo al trentatreesimo giorno dall'inoculo si è registrato un andamento decrescente e la quantità totale di idrogeno è scesa fino a 67 mmol.

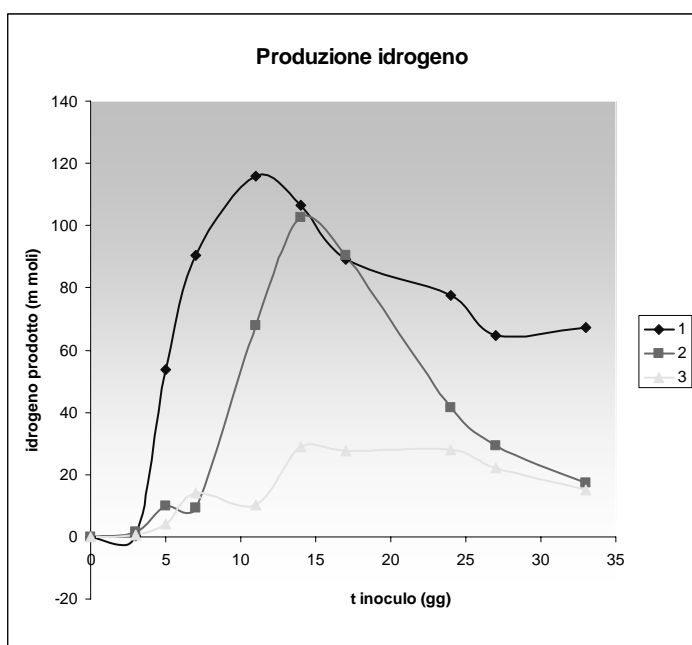


Figura 5: Quantità totale di idrogeno prodotto dalle colture di *C. reinhardtii* in 200 ml di terreno TAP senza zolfo in funzione del tempo.

Per le colture 4, 5, e 6, in cui la quantità di terreno all'interno di ciascuna bottiglia era doppia rispetto alle colture 1, 2, e 3, e, di conseguenza, la quantità di cellule coltivate era raddoppiata, i risultati più soddisfacenti sono stati raggiunti con il campione 5 (*C. reinhardtii* sottoposta a illuminazione artificiale con lampada allo xeno con  $T_c = 6800K$ ) in cui la quantità totale di idrogeno prodotto è stata crescente nel tempo fino al quattordicesimo giorno dall'inoculo in corrispondenza del quale è stato raggiunto il valore massimo di 286 mmol/400 ml di TAP (Figura 6). Dal quattordicesimo al diciassettesimo giorno dall'inoculo si è registrato un andamento decrescente e la quantità totale di idrogeno è scesa fino a 17-18 mmol e tale valore si è mantenuto costante fino al trentatreesimo giorno.

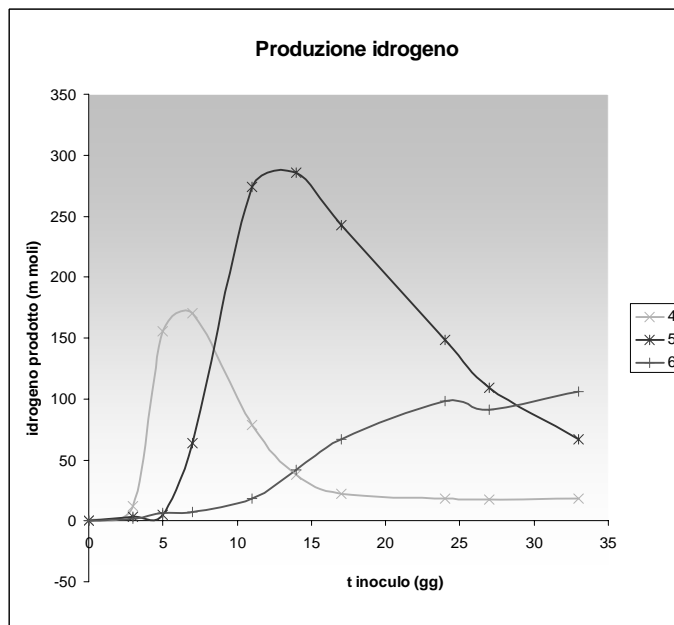


Figura 6: Quantità totale di idrogeno prodotto dalle colture di *C. reinhardtii* in 400 ml di terreno TAP senza zolfo in funzione del tempo.

## CONCLUSIONI

I risultati della sperimentazione descritta dimostrano che:

- 1) l'uso di terreno TAP privo di zolfo e solfati per la coltivazione dell'alga *C. reinhardtii* si associa ad una maggiore produzione di idrogeno,
- 2) la quantità di idrogeno prodotto è proporzionale al numero di cellule di *Chlamydomonas* coltivate,
- 3) la esposizione delle colture a luce artificiale è associata ad una maggiore produzione di idrogeno rispetto all'esposizione a luce solare,
- 4) la massima produzione di idrogeno (286 mmol/400ml di TAP) è stata registrata dopo esposizione alla luce da lampada allo xeno, dopo 14 giorni dall'inoculo.

Non si è ritenuto opportuno normalizzare i quantitativi di idrogeno prodotto al volume di terreno poiché tale produzione dipende sia dal volume della coltura, sia dalla superficie libera di interfaccia con l'aria che con la superficie direttamente esposta alla luce solare.

## BIBLIOGRAFIA

1. Belcher H. and Swale E., Culturing algae: a guide for school and colleges. Culture collection of Algae and Protozoa, Ambleside, England, U.K. 1988.
2. Bistoni F., Mencacci A., Cenci E., Montecarlo I., Corbucci C., Rossi F., Giuliobello M., Sviluppo di un dispositivo per l'ottenimento di idrogeno mediante processi fotobiologici. 6° Congresso Nazionale CIRIAF - Atti (Perugia 7/8 aprile 2006).
3. Gaffron H., Reduction of  $CO_2$  with  $H_2$  in green plants. Nature, vol. 143, pp 204-205, 1939.
4. Gaffron H. and Rubin J., Fermentative and photochemical production of hydrogen in algae. Journal of General Physiology, vol. 26, pp. 219-240, 1942.

5. Greenbaum E., Photosynthetic hydrogen and oxygen production: kinetic studies. *Science*, vol. 196, pp 879-880, 1982.
6. Ji Hye Jo, Dae Sung Lee, Jong Moon Park, Modeling and Optimization of Photosynthetic Hydrogen Gas Production by Green Alga *Chlamydomonas reinhardtii* in Sulfur- Deprived Circumstance. *Biotechnol. Prog.* Vol. 22, pp. 431-437, 2006.
7. Melis A., Zhang L., Forestier M., Ghirardi M.L., Seibert M., Sustained Photobiological Hydrogen Gas Production upon Reversible Inactivation of Oxygen Evolution in the Green Alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiology*, vol. 122, pp 127-135, 2000.
8. Mencacci A., Montecarlo I, Cenci E., Corsi N., Urbani M., Bistoni F. Proposta di un foto-bioreattore per la produzione di idrogeno. 61° Congresso Nazionale ATI – Atti (Perugia 12-15 Settembre 2006).
9. Myake M and Asada Y. Abstracts of the “4th Int. Conference on the Mol Biol. Hydrogenases” 104-105, 1994
10. Nerad T.A., ATCC Catalogue of protists. American Type Culture Collection, Rockville, Mariland, USA. 1991



## IL LIFE CYCLE ASSESSMENT NELLA GENERAZIONE ELETTRICA DA FONTI RINNOVABILI:IL CASO DELLE “WIND FARM”

Nicola Cardinale<sup>1</sup>, Francesco Ruggiero<sup>2</sup>, Giuseppe Arpino<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell’Ambiente, University of Basilicata

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze dell’Ingegneria Civile e dell’Architettura, Politecnico di Bari  
Via Orabona 4, 70126, Bari, Italy. Tel. +39-080-5963870 Fax: +39-0805963823 e-mail: ruggiero@poliba.it

<sup>3</sup> Libero Professionista

### SOMMARIO

Lo strumento del Life Cycle Assessment (LCA) è nato per valutare correttamente l’impatto a lungo termine di un bene o un prodotto, analizzandone l’intero ciclo vitale dalla fornitura della materia prima fino all’utilizzo del prodotto stesso e al suo smaltimento finale.

Nel presente lavoro attraverso l’applicazione della metodologia LCA e partendo dalla valutazione dell’energia e delle emissioni dovute al processo manifatturiero dei componenti delle Wind farm onshore, si determinerà la convenienza ambientale dell’utilizzo di questa tecnologia. Nel caso degli aerogeneratori eolici, infatti, appare evidente l’importanza della relazione fra il consumo di energia necessaria per la loro produzione e la quantità di energia che riescono a produrre nel corso della loro vita utile, attraverso la determinazione del tempo nel quale un impianto è in grado di restituire l’energia spesa per la sua costruzione. Un altro importante risultato è quello della valutazione del bilancio della CO<sub>2</sub> durante tutta la vita utile dell’impianto, al fine di determinare la quantità di anidride carbonica evitata in ambiente e, quindi, il beneficio ambientale dovuto all’impiego degli aerogeneratori eolici. Lo studio è applicato al parco eolico onshore della Regione Basilicata rappresentativo della tipologia di impianti eolici presenti sul territorio italiano e, in particolare, di quello collinare meridionale.

### 1 INTRODUZIONE

Gli attuali costi di produzione e l’affidabilità delle tecnologie esistenti rendono l’energia eolica la migliore soluzione disponibile per la generazione elettrica da fonte rinnovabile, tanto che recenti studi stimano il potenziale di crescita in Italia in 130-140 GWh/anno.

Per un confronto trasparente con la produzione di energia da fonti fossili, con particolare riferimento all’impatto ambientale, sarebbe opportuno considerare non solo le componenti tecniche ed economiche del confronto ma, anche, gli oneri esterni e le ricadute positive e negative da questi derivanti

In questo caso il Life Cycle Assessment (LCA) può rappresentare uno strumento interessante per la pianificazione di un nuovo parco eolico, perché consente di identificare gli aspetti rilevanti di una procedura di valutazione di impatto ambientale. Lo strumento LCA è infatti nato per consentire ai produttori ed agli utilizzatori la corretta valutazione, e quindi il controllo, dell’impatto a lungo termine dei propri prodotti e, nel caso specifico, di evidenziare gli effettivi benefici ambientali nell’utilizzo di una tecnologia rinnovabile, come quella eolica, al centro delle attenzioni economiche, politiche e sociali nell’Italia meridionale.

### 2 ENERGIA PRODOTTA DALLE WIND FARM IN BASILICATA

L’energia elettrica prodotta da un aerogeneratore eolico dipende chiaramente dalle condizioni ambientali del luogo in cui è installato con particolare riferimento alle condizioni anemometriche e alla rugosità dell’area.

In questo studio, per calcolare la produzione annuale di

energia elettrica di un impianto eolico si è utilizzata l’applicazione “Power Calculator” [1], strumento di calcolo messo a punto dalla Danish Wind Industry Association. Dall’osservazione delle mappe del vento elaborate dal CESI [2] si nota che la Regione Basilicata è tra le regioni più idonee per all’installazione di aerogeneratori avendo su quasi tutto il territorio una velocità media annua del vento superiore ad altre regioni italiane. In particolare, nei territori in cui sono presenti le Wind Farm, la velocità media annua varia da 6 a 10 m/s ad una altezza dal suolo compresa tra 50 e 70 metri, valori ottimali per uno sfruttamento industriale della tecnologia eolica [3].

La situazione impiantistica per il territorio lucano è riportata in Tabella 1. Non avendo a disposizione informazioni sulla casa costruttrice e sulle caratteristiche tecniche di ciascun aerogeneratore installato, ai fini delle valutazioni del presente lavoro si è fatto riferimento alle turbine della Vestas [4] azienda leader del settore, le cui prestazioni energetiche non differiscono significativamente da quelle delle altre marche.

Come esempio, si riporta il calcolo eseguito considerando l’energia elettrica prodotta da un aerogeneratore eolico di 2,0 MW della Vestas avente le seguenti caratteristiche:

- Diametro: 80 metri
- Altezza del mozzo: 80 metri (effettivi 78)
- Velocità di avvio: 4m/s
- Velocità di arresto: 25 m/s

La turbina è installata nel territorio di Brindisi di Montagna in località Monte Cute che presenta una altezza media sul livello del mare di 850 metri. Dallo studio della mappa del vento messa a disposizione dal CESI, a 70 metri di quota quasi tutta la zona mostra una velocità media annua compresa tra 7 e 8 m/s. Si è ipotizzato, inoltre, che la temperatura media sia di 9,4°C e che il sito abbia un coefficiente di rugosità pari a 1,5 (valore medio tra le classi di rugosità 1 e 2).

Tabella 1 - Impianti eolici in Basilicata

Sito	n° turbine	Potenza unitaria (MWe)	Potenza totale (MWe)
Forenza-Maschito	50	0,65	32,5
Avigliano	20	0,65	13
Vaglio Basilicata	20	0,65	13
Colobraro	3	0,65	1,95
Corleto Peticara	11	0,85	9,35
Brindisi di Montagna	30	2,0	60
Gorgoglione	5	0,65	3,25
Montemurro	8	0,65	5,2
	28	0,85	23,8
	17	2,0	34
<b>Totale</b>	<b>162</b>		<b>195,95</b>

(fonte: Elaborazione CCSE (Comitato Lucano per il Controllo delle Scelte Energetiche)

Tabella 2 - Valutazione dell'energia prodotta dagli impianti eolici in Basilicata

Sito	Energia elettrica generata per turbina [kWh/anno]	Energia elettrica generata per turbina in 20 anni [kWh]	Energia elettrica generata dalla Wind farm in 20 anni [kWh]
Forenza-Maschito	1.566.478	31.329.560	1.566.478.000
Avigliano	1.536.061	30.721.220	614.424.400
Vaglio Basilicata	1.551.269	31.025.380	620.507.600
Colobraro	1.566.478	31.329.560	93.988.680
Corleto Peticara	2.103.664	42.073.280	462.806.080
Brindisi di Montagna	5.023.150	100.463.000	3.013.890.000
Gorgoglione	1.551.269	31.025.380	155.126.900
Montemurro	1.536.061	30.721.220	245.769.600
	2.122.281	42.445.620	1.188.477.360
	5.023.150	100.463.000	1.707.871.000

Figura 1 Applicazione “Power Calculator”

Il risultato indica un valore di energia generata pari a 5.023.150 kWh/anno, pertanto in 20 anni la quantità di energia prodotta complessivamente è 100.463.000 kWh. I calcoli sono stati ripetuti per tutto il parco eolico analizzato (in esercizio o in fase di ultimazione) e i risultati sono riportati nella Tabella 2.

Una osservazione molto importante riguarda il fattore di capacità ottenuto attraverso l'applicazione Power Calculator. Il *fattore di capacità* è il rapporto tra l'energia effettivamente erogata in un anno e quella che l'aerogeneratore avrebbe potuto produrre se avesse funzionato ininterrottamente per tutte le 8760 ore dell'anno alla potenza di targa [3]. Questo valore è molto simile a quelli ottenuti per gli altri siti lucani ed è indicativo dell'efficienza produttiva delle turbine installate on-shore, attualmente sul mercato. È dunque possibile, in alternativa, effettuare i calcoli dell'energia elettrica prodotta considerando un fattore di capacità del 30%.

A conferma dei dati ottenuti attraverso il calcolo, si è quindi proceduto ad una loro verifica con i dati presenti in letteratura. Ad esempio dagli studi del Risø National Laboratory<sup>1</sup> risulta che la produzione di energia elettrica di una turbina da 0,5 MW è 1.100.000 kWh/anno [5] mentre la produzione di energia elettrica di una turbina Vestas da 2,0 MW è di circa 5 volte superiore e pari a 5.634.000 kWh/anno[6].

Partendo da questi valori estremi si è poi interpolato ottenendo la quantità di energia generata da una qualsiasi turbina avente potenza nominale compresa tra 0,5 e 2,0 MW.

Quindi, per una turbina da 0,65 MW si ottiene una energia generata pari a 1.536.000 kWh/anno, per una turbina da 0,85 MW il valore è di 2.117.333 kWh/anno mentre per un aerogeneratore eolico di 0,6 MW la produzione è di 1.390.666 kWh/anno. L'ultimo valore ottenuto può essere preso come ulteriore verifica, al fine di confermare la validità dell'interpolazione con cui si è calcolata l'energia elettrica, in quanto il dato ottenuto è analogo a quello calcolato dalla Danish Wind Turbine Manufacturers Association e riportato in [7].

Come si può notare i valori presi dalla letteratura e interpolati sono molto prossimi a tutti i valori ricavati con il simulatore Power Calculator e riportati in Tabella 2.

### 3 ENERGY PAY BACK TIME DI UNA WIND FARM

Un aspetto decisamente interessante nella valutazione degli impianti eolici è il rapporto fra il consumo totale di energia della turbina e la produzione di energia media prevista. Questo valore rappresenta il tempo nel quale un impianto è in grado di restituire l'energia spesa per la sua costruzione, praticamente **“l'energy pay back time”** (EPBT), definito come *il periodo oltre il quale la turbina ha ripagato il consumo energetico da essa sostenuto nelle varie fasi di estrazione, produzione, progettazione, trasporto, installazione, futuro smantellamento e riciclaggio dell'opera.*

I dati sul consumo durante il life cycle degli aerogeneratori eolici sono riferiti alle analisi LCA condotte dalla Vestas e dal

<sup>1</sup> Il Risø National Laboratory è una prestigiosa istituzione di ricerca danese che ha sede presso la Technical University of Denmark.

RisØ National Laboratory su due turbine rispettivamente da 2 MW e da 0,5 MW.

Considerando solo le analisi condotte su turbine installate sulla terraferma (onshore) i risultati relativi ad una turbina da 2,0 MW sono riportati in Tabella 3, mentre in Tabella 4 sono illustrati i dati di una Wind farm onshore composta da 18 turbine da 0,5 MW da cui è possibile ricavare il valore di una singola unità.

Tabella 3 - Consumo di energia di una turbina da 2,0 MW suddiviso in fasi LCA [6]

Energy consumption [kJ/kWh]				
	Manufacturing/dis mantling	Operation	Transport	Total
<b>Fossil fuel</b>				
Coal	18,11	1,55	0,00	19,66
Oil	46,56	6,45	0,56	53,57
Gas	13,33	0,99	0,04	14,35
Brown coal	3,48	0,47	2,25E-08	3,96
<b>Renewal energy</b>				
Water	19,51	0,78	0,00	20,29
Straw	7,00E-07	0,00E+00	0	7,00E-07
Wood	5,81E-07	0,00E+00	0	5,81E-07
Other bio mass	4,80E-01	3,40E-02	4,03E-08	0,51
Nuclear power	3,08	0,40	3,72E-05	3,49
Wind power	0,33			0,33
<b>Total (kJ/kWh)</b>	<b>104,88</b>	<b>10,69</b>	<b>0,60</b>	<b>116,16</b>
<b>Total (kJ/turbine)</b>	11.817.806.148	1.203.992.76	67.261.641	13.089.060.549
<b>Total (kWh/turbine) in the lifetime</b>	<b>3.282.723</b>	<b>334.442</b>	<b>18.684</b>	<b>3.635.850</b>

Tabella 4 - Consumo di energia primaria di una Wind farm onshore [5]

	Offshore wind farm GJ	Wind farm on land GJ
Steel	12056	20015
Rebars	7032	6329
Aluminium	500	899
Copper	2215	476
Lead	1209	0
Plastic	116	209
Glass	103	186
Concrete and sand	20642	18647
Total	43873	46761

Come si può notare il consumo totale di energia per una turbina da 2 MW è di 3.635.850 kWh mentre per una turbina da 0,5 MW è di 721.620 kWh. Anche in questo caso il rapporto tra i due valori è pari a 5 così come è avvenuto per il calcolo sull'energia prodotta annualmente dalle stesse macchine.

Sulla base di questo risultato si è deciso di interpolare, così come per il calcolo dell'energia prodotta, ottenendo un grado di approssimazione del tutto accettabile rispetto agli ordini di grandezza coinvolti e alle finalità della presente trattazione.

Si ottengono quindi i valori di 915.000 kWh per la turbina da 0,6 MW, 1.013.000 kWh per la turbina da 0,65 MW e 1.401.000 kWh per quella da 0,85 MW.

A questo punto è possibile calcolare l'EPBT. I risultati si riferiscono rispettivamente a turbine da 0,5 MW, 0,6 MW 0,65 MW, 0,85 MW e 2,0 MW:

- $721.620 \text{ [kWh/turbina]} / 1.100.000 \text{ [kWh/turbina} \cdot \text{anno]} \approx 0,65 \text{ anni} \approx 8 \text{ mesi}$
- $915.000 \text{ [kWh/turbina]} / 1.390.666 \text{ [kWh/turbina} \cdot \text{anno]} \approx 0,66 \text{ anni} \approx 8 \text{ mesi}$

- $1.013.043 \text{ [kWh/turbina]} / 1.536.000 \text{ [kWh/turbina} \cdot \text{anno]} \approx 0,66 \text{ anni} \approx 8 \text{ mesi}$
- $1.401.607 \text{ [kWh/turbina]} / 2.117.333 \text{ [kWh/turbina} \cdot \text{anno]} \approx 0,66 \text{ anni} \approx 8 \text{ mesi}$
- $3.635.850 \text{ [kWh/turbina]} / 5.634.000 \text{ [kWh/turbina} \cdot \text{anno]} \approx 0,65 \text{ anni} \approx 8 \text{ mesi}$

Otto mesi è quindi il tempo entro il quale la turbina ripaga il suo costo energetico. Si precisa che i per i siti della Basilicata, data la piccola differenza nella energia prodotta rispetto ai casi danesi, il valore può variare di circa 1 mese, comunque mantenendosi molto basso.

Il metodo utilizzato in questo lavoro differisce da quello riportato negli studi condotti dal RisØ National Laboratory [5] e in quelli della Danish Wind Turbine Manufacturers Association [7] dove si è considerata invece che l'energia prodotta da una turbina, *l'energia primaria evitata* cioè l'energia che altrimenti sarebbe stata consumata per produrre la stessa quantità di energia elettrica che una turbina produce in un anno. Comunque, qualora si moltiplicasse il valore dell'energia prodotta per il rendimento energetico medio del parco termoelettrico italiano, pari a 0,4, si otterrebbero risultati coincidenti.

La scelta del calcolo dell'energia elettrica prodotta è stata dettata dal fatto che è la metodologia attualmente utilizzata più dalla Vestas nei suoi studi sul LCA e che i risultati dei tempi di Energy Pay Back Time sono maggiori e, quindi, più cautelativi. In tal modo si compensano eventuali fattori di incertezza nel calcolo.

#### 4 VALUTAZIONE DELLE EMISSIONI DI CO<sub>2</sub> EVITATE DALLE WIND FARM IN BASILICATA

Un altro aspetto fondamentale degli studi LCA riguarda la valutazione dell'impatto ambientale durante tutto il ciclo di vita della turbina, dall'estrazione delle materie prime necessarie alla produzione dei materiali componenti, alla produzione di energia utile nei processi di assemblaggio, fino alla dismissione dell'opera ed il relativo smaltimento in discarica. L'agente inquinante preso come riferimento nel ciclo di vita delle turbine è la CO<sub>2</sub> poiché questa è prodotta nella maggior parte delle fasi di LCA. Le produzioni maggiori di CO<sub>2</sub> sono dovute essenzialmente alla fase di estrazione delle materie prime, alla fase di assemblaggio della turbina, alla produzione di energia utile nei processi e alla fase di trasporto.

In Tabella 5 sono riportate le emissioni di CO<sub>2</sub> relative ad una turbina da 2,0 MW; si può notare come la fase di trasporto è quella che contribuisce meno al totale di emissioni di CO<sub>2</sub>, rispetto alla fase di costruzione e dismissione dell'opera.

Tabella 5 - Emissioni in atmosfera per kWh prodotto da una turbina [6]

Tipo di Turbina	Emissioni [g / kWh]	Costruzione/ smantellamento	Fase Operativa	Trasporto	Tot
2,0 MW	CO2	6,1	0,69	0,045	≈7

Utilizzando i dati di Tabella 5 è possibile calcolare la quantità in Kg di CO<sub>2</sub> nei venti anni di produzione di energia elettrica dell'aerogeneratore:

$$0,007 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} \cdot 112.680.000 \text{ kWh} = 788.760 \text{ kg CO}_2/\text{turbina}$$

Analogamente per una turbina da 0,5 MW i chilogrammi di

anidride carbonica emessi durante il suo ciclo di vita sono pari a 213.400 [5].

In questo caso si ottiene un rapporto tra le emissioni delle due turbine pari al rapporto tra le potenze, cioè 4. Andando, pertanto ad interpolare è possibile ottenere con buona approssimazione i dati relativi agli aerogeneratori con potenza compresa tra 0,5 e 2,0 MW.

In 20 anni di vita utile si ottengono rispettivamente:

- 251.757 kg CO<sub>2</sub> emessi da una turbina da 0,60 MW
- 270.936 kg CO<sub>2</sub> emessi da una turbina da 0,65 MW
- 347.650 kg CO<sub>2</sub> emessi da una turbina da 0,85 MW

Le quantità di CO<sub>2</sub> rilasciate in atmosfera sono notevolmente inferiori a quelle rilasciate attraverso altri sistemi convenzionali di produzione di energia elettrica.

A titolo di esempio, la Tabella 6 riporta un confronto tra la CO<sub>2</sub> relativa alla Wind farm di Brindisi di Montagna e la quantità di anidride carbonica altrimenti emessa da centrali convenzionali di produzione di energia elettrica, nell'ipotesi che ognuna di esse fornisca tutta l'energia elettrica.

Attraverso il Boustead Model [8] infatti, sono stati ottenuti i kg di CO<sub>2</sub> per MJ di elettricità generata, emessi rispettivamente da centrali a carbone, a petrolio, a gas naturale, a gas artificiale, a rifiuti urbani. I valori sono stati moltiplicati per l'energia elettrica generata in 20 anni dalla Wind farm di Brindisi di Montagna ottenendo la quantità di CO<sub>2</sub> evitata.

Infine, il calcolo è stato esteso a tutto il parco eolico della Regione Basilicata e, nella Tabella 7, è riportato il risultato del bilancio netto di CO<sub>2</sub> in 20 anni, per ogni Wind farm presa in considerazione nello studio, adottando l'ipotesi di produzione con impianti a gas naturale, che rappresentano la tipologia di impianti convenzionali più diffusi.

## CONCLUSIONI

L'attenzione sempre crescente per la produzione di energia da fonte rinnovabile e la convenienza economica della fonte eolica rispetto ad altre fonti, ha prodotto un interesse sempre maggiore verso questa tecnologia, così come dimostrato dalle richieste di nuove installazioni presentate presso gli sportelli energia delle regioni italiane specie del meridione.

In questo studio si è cercato di evidenziare l'importanza della relazione fra il consumo di energia necessaria per la costruzione di una Wind farm onshore e la quantità di energia prodotta dalla centrale eolica nel corso della sua vita utile, attraverso la determinazione del tempo nel quale un impianto è in grado di restituire l'energia spesa per la sua costruzione.

Si è evidenziato come usando dati di origine diversa e metodologie differenti, i risultati ottenuti non variano in modo significativo, consentendo di estrapolare i risultati a impianti di altra potenza nominale.

Attraverso l'analisi LCA si è ottenuto, infatti, un Energy Pay Back Time pari a circa 8-9 mesi che rende gli impianti eolici onshore in Italia meridionale (di cui la Basilicata è rappresentativa) assolutamente competitivi dal punto di vista energetico.

Analogamente è stato possibile valutare il bilancio della CO<sub>2</sub> durante tutta la vita utile dell'impianto al fine di determinare la quantità di anidride carbonica evitata in ambiente e, quindi, il beneficio ambientale dovuto all'impiego degli aerogeneratori eolici. La notevole quantità di CO<sub>2</sub> non emessa in atmosfera contribuisce al rispetto del protocollo di Kyoto nell'ambito del quale l'Italia si è impegnata a ridurre le proprie emissioni di gas serra nei prossimi 5 anni.

Tabella 6 - Bilancio netto di CO<sub>2</sub> per la Wind farm di Brindisi di Montagna (Pz)

Generazione di energia elettrica da centrali termoelettriche a :	Energia elettrica generata in 20 anni dalle 30 turbine eoliche	Emissioni di CO <sub>2</sub> evitate	Emissioni di CO <sub>2</sub> in 20 anni dalle 30 turbine eoliche	Bilancio Netto di CO <sub>2</sub> in 20 anni	
	Kg CO <sub>2</sub> / MJ **	MWh	t	t	
<b>Carbone</b>	0,286	3.013.890	3.103.101	23.663	3.079.438
<b>Petrolio</b>	0,209	3.013.890	2.267.651	23.663	2.243.988
<b>Gas Naturale</b>	0,156	3.013.890	1.692.601	23.663	1.668.938
<b>Gas Artificiale</b>	0,181	3.013.890	1.963.851	23.663	1.940.188
<b>Rifiuti Industriali</b>	0,083	3.013.890	900.550	23.663	876.887
<b>Rifiuti Municipali</b>	0,449	3.013.890	4.871.652	23.663	4.847.989

\*\* Fonte Boustead Model [8]

Tabella 7 - Totale emissioni evitate in Basilicata in 20 anni nell'ipotesi di impianti eolici alternativi a impianti a gas naturale

Sito	n° turbine	EMISSIONI EVITATE Bilancio Netto di CO <sub>2</sub> in 20 anni (t)
Forenza-Maschito	50	866.477
Avigliano	20	339.402
Vaglio Basilicata	20	343.334
Colobraro	3	51.977
Corleto Perticara	11	256.193
Brindisi di Montagna	30	1.668.938
Gorgoglione	5	85.693
Montemurro		
	8	135.986
	28	657.437
	17	946.000
<b>Totale</b>		<b>5.351.437</b>

## BIBLIOGRAFIA

1. <http://www.windpower.org/en/tour/wres/pow/index.htm>;
2. <http://www.ricercadisistema.it/pagine/notiziedoc/61/index.htm>;
3. Coiante D., *Le nuove fonti di energia rinnovabile, tecnologie costi e prospettive*, cap. 4.3, Franco Angeli Editore, anno 2004;
4. [http://www.vestas.com/vestas/global/en/Products/Download\\_brochures/download\\_brochurer.htm](http://www.vestas.com/vestas/global/en/Products/Download_brochures/download_brochurer.htm);
5. Schleisner L., *Life Cycle Assessment of a Wind farm and Related Externalities*, Renewable Energy Volume: 20, Issue: 3, July 1, 2000, pp. 279-288;
6. Elsam Engineering A/S, *Life Cycle Assessment of offshore and onshore sited wind farms*, pp. 14-40, 20 ottobre 2004;
7. Danish Wind Turbine Manufacturers Association, *The energy balance of modern wind turbines*, Wind Power Note no. 16, p. 7, dicembre 1997;
8. Software "Boustead Model", versione 5.0, 2006;

## VALORIZZAZIONE ENERGETICA DEGLI SCARTI DI POTATURA DEI VIGNETI

Gianluca Cavalaglio, Stefano Cotana, Marco Barbanera, Daniele Giraldi

Centro di Ricerca sulle Biomasse, Via M. Iorio 8, Tel. 075.500.42.09  
cavalaglio@crbnet.it, cotanas@tiscali.it, giraldi@crbnet.it, barbanera@crbnet.it

### SOMMARIO

La filiera agro-energetica di recupero degli scarti di potatura delle viti è in fase di realizzazione presso un'azienda vitivinicola umbra. La filiera si articola nelle fasi di raccolta e stoccaggio delle potature, cippatura delle rotoballe e conversione energetica del cippato mediante caldaia ad olio diatermico. La rotoimballatura dei residui è stata eseguita nelle due annate 2006 e 2007. L'esperienza maturata nel corso del primo anno di raccolta ha consentito di eseguire alcune modifiche alla rotoimballatrice, raggiungendo nel secondo anno produzioni di biomassa sensibilmente superiori. La cippatura delle rotoballe, date le elevate dimensioni delle balle prodotte, è stata realizzata tramite l'impiego di un carro miscelatore. La fase di conversione energetica sarà eseguita mediante l'impiego di una caldaia ad olio diatermico di potenza termica utile pari a 400 kW, attualmente in fase di realizzazione; la biomassa raccolta consentirà la produzione di calore per il riscaldamento dei locali dell'azienda, acqua refrigerata fino a -10°C per il processo di vinificazione, acqua a 7°C per il condizionamento estivo dei locali e vapore per i processi di sterilizzazione delle bottiglie. Lo sviluppo futuro del progetto prevede l'impiego di un prototipo di spazzole da applicare alla rotoimballatrice e l'installazione di ulteriori cinque macchine frigorifere ad assorbimento.

### 1. INTRODUZIONE

Il recupero energetico di biomasse residuali rappresenta un tema di profonda attualità, sia in considerazione del rispetto degli obiettivi previsti dal Protocollo di Kyoto, sia in considerazione della necessità da parte dell'Italia di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili.

Il potenziale di biomasse residuali in agricoltura è costituito principalmente da potature di vite, olivo e frutteto, che generalmente sono trinciati e poi interrati, o direttamente bruciati a bordo campo, costituendo un costo aggiuntivo per l'agricoltore. La quantità di residui agricoli può essere determinata moltiplicando la superficie agricola utilizzata (SAU) per un coefficiente, determinato dal CEESTAT (Centro Studi sull'Agricoltura, l'Ambiente e il Territorio) e confermato dal SESIRCA (Servizio e Sperimentazione, Innovazione e Ricerca sull'Agricoltura), che descrive la produttività in t/ha. La produzione media di residui (t/ha) ed il rapporto residuo prodotto sul territorio nazionale delle principali colture agricole, sono riportati in tabella 1. [1]

Tabella 1: Produzione media di residui (t/ha) e rapporto residuo/prodotto in Italia

Pianta	Residuo/prodotto(t/ha)	Residuo/prodotto(w.b.)
Vite	2,9	0,2-0,8 [2]
Olivo	1,7	0,5-0,6
Melo	2,4	0,1
Pero	2,0	0,1
Pesco	2,9	0,2
Agrumi	1,8	0,1
Mandorlo	1,7	1,9
Nocciolo	2,8	1,9

Il progetto di filiera agro-energetica ERAASPV – “Progetto Biomasse: energia rinnovabile per le aziende agricole derivante da scarti di potatura dei vigneti”, pubblicato dal Ministero delle Politiche Agricole e Forestali ed approvato ad Ottobre 2006, si inserisce nell'ottica di un impiego energetico delle biomasse residuali. Il progetto di ricerca è rivolto alla realizzazione di un impianto pilota per il recupero energetico degli scarti di potatura dei vigneti presso la rinomata azienda vitivinicola umbra “Cantine Giorgio Lungarotti” che possiede circa 200 ettari coltivati a vigneti.

La filiera di recupero degli scarti di potatura consiste essenzialmente nelle seguenti fasi:

- raccolta dei sarmenti (rotoimballatura)
- trasporto, stoccaggio ed essiccazione delle rotoballe
- cippatura delle rotoballe e stoccaggio
- conversione energetica del cippato

Allo stato attuale sono state messe a punto le fasi di rotoimballatura, stoccaggio e cippatura, mentre sono in fase di realizzazione i locali di stoccaggio del cippato e la centrale termica, nonché la rete impiantistica di allaccio agli impianti esistenti.

### 2. ROTOIMBALLATURA DEI SARMENTI DI VITE

#### 2.1 Cantieri di Raccolta 2006 e 2007

La fase di rotoimballatura è stata eseguita impiegando una rotopressa Lerda modello T110, alimentata e movimentata da un trattore New Holland modello 82/86 di potenza pari a 80 Hp; le caratteristiche tecniche principali della rotoimballatrice sono riportate nella tabella 2, mentre la figura 1 mostra la rotoimballatrice.

Tabella 2: Caratteristiche principali rotoimballatrice

Lunghezza massima	320 cm
Larghezza massima	209 cm
Peso	1360 Kg
Potenza richiesta	35/45 hp
Lunghezza balle	110 cm
Diametro balle	100 cm



Figura 1: Macchina rotoimballatrice

Nel corso del 2006 è stata eseguita la prima campagna di raccolta delle potature. La rotoimballatura è stata compiuta in testa ai filari poiché la raccolta delle potature, a causa di un ritardo nella consegna della macchina, è stata eseguita nei mesi di Aprile e Maggio, quando è necessario aver già ripulito i filari al fine di eseguire i trattamenti ai vigneti.

Pertanto le potature sono state precedentemente portate in testa ai filari mediante un trattore munito di rastrello e sono state accatastate in punti dove non fossero d'intralcio alle normali attività vitivinicole. Essendo tali punti inaccessibili alla rotoimballatrice, si è reso necessario un escavatore per movimentare la biomassa e ridistribuirli in testa al filare dove è stata raccolta. Le complicate operazioni di raccolta del primo anno hanno pertanto richiesto la presenza di due operatori, uno alla guida del trattore ed uno alla guida dell'escavatore, con conseguente dilatazione dei tempi di raccolta ed aumento delle perdite di materiale. Una foto delle operazioni è riportata nella figura 2.



Figura 2: Immagine del cantiere di raccolta 2006

Durante la seconda campagna di misure (Gennaio-Marzo 2007) il cantiere di raccolta è stato organizzato impiegando solamente la rotopressa movimentata dal trattore all'intero dei filari, procedendo di pari passo con la fase di potatura.

La fase di potatura è stata eseguita da parte degli operai dell'azienda in modo da lasciare cadere i sarmenti di due filari in un unico filare, dimezzando di fatto i successivi tempi di raccolta della macchina.

Infine, le osservazioni raccolte nel corso della prima campagna, hanno determinato la necessità di elaborare alcune modifiche alla macchina rotoimballatrice.

## 2.2 Modifiche alla Macchina Rotoimballatrice

Le dimensioni della macchina sono state inizialmente scelte come compromesso tra le dimensioni di ingombro della sagoma (minore possibile) e le dimensioni della rotoballa prodotta. Le dimensioni della rotoballa, infatti, influiscono molto sui costi di movimentazione e trasporto, in quanto, maggiore è il numero delle singole balle, maggiore è il tempo necessario per la movimentazione nelle fasi di carico, scarico e per le lavorazioni di triturazione prima di passare alla caldaia.

La macchina, pur non avendo mostrato carenze rilevanti, ha evidenziato alcune imperfezioni.

I difetti emersi riguardano il sistema di legatura e taglio del filo: i sarmenti più lunghi, prima di entrare nella camera rotante, si incastrano sul carrello di tale apparato o vanno ad intrecciarsi con il filo, ostacolando il suo scorrimento e quindi la rilegatura della rotopressa. Le modifiche in questo caso hanno riguardato la realizzazione di un carter in lamiera che separa l'organo di legatura dalla zona di incanalamento del materiale.

Per minimizzare il rapporto costo-energia della filiera, è necessario ridurre ed accelerare il più possibile le operazioni, pertanto, la rotoimballatrice deve poter muoversi all'interno dei filari. Nel caso in cui la distanza tra i filari sia di 200 o 220 centimetri, tendenza di realizzazione dei vigneti moderni, sono state sostituite le ruote in gomma montate di serie, posizionate lateralmente alla struttura della macchina, con dei rulli in ferro, opportunamente dimensionati e applicati all'interno della sagoma della rotoimballatrice in modo da portare l'ingombro in larghezza da 2,09 a 1,54 metri.

Un'immagine della rotoimballatrice modificata all'interno di un filare di 200 cm è riportata nella figura 3.



Figura 3: Immagine del cantiere di raccolta 2007

### 2.3 Risultati Cantieri 2006 e 2007

Le differenze principali delle due campagne di raccolta sperimentate sono:

- cantiere costituito da macchina rotoimballatrice ed escavatore nel 2006, solo dalla macchina rotoimballatrice opportunamente modificata nel 2007;
- presenza di due operatori nel 2006, un unico operatore nel 2007;
- raccolta delle potature in testa ai filari nel 2006, raccolta all'interno dei filari, procedendo su file alternate nel 2007.

Relativamente alla campagna 2006, la tabella 3 mostra le caratteristiche dei vigneti monitorati e le produzioni ottenute; la figura 4 visualizza le produttività dei vigneti; la tabella 4 mostra i principali risultati ottenuti nella fase di rotoimballatura.

Per quanto riguarda invece la campagna 2007, la tabella 5 mostra le caratteristiche dei vigneti monitorati, diversi per esigenze agronomiche da quelli del 2006, e le produzioni ottenute; la figura 5 visualizza le produttività dei vigneti; la tabella 6 mostra i principali risultati ottenuti nella fase di rotoimballatura.

Tabella 3: caratteristiche e produzioni dei vigneti (2006)

Vigneto	Età (anni)	Larghezza filare (m)	Superficie (ha)	Biomassa prodotta (t/ha)
A	4	2,5	5,31	0,49
B	3	2,5	1,68	0,06
C	4	3,5	3,07	0,39
D	3	2,5	0,99	0,61
E	6	2,5	1,27	0,87
F	6	2,5-3,5	1,25	0,81

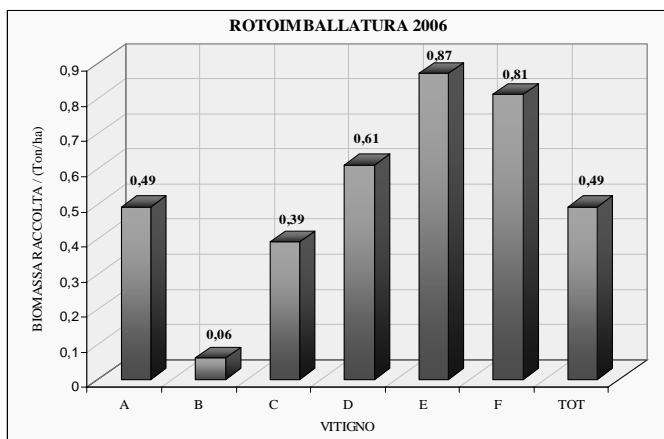


Figura 4: Produzione vitigni 2006

Tabella 4: Risultati principali campagna 2006

Area cantiere	13,57 ha
Produzione raccogliabile *	0,99 t s.s./ha
Produzione raccolta *	0,49 t s.s./ha
Perdite	0,50 t s.s./ha (50%)
Tempo impiegato **	3,18 h/t s.s.
Consumo gasolio	24,25 lt/t s.s.
Costo rotoimballatura	86,97 €/t s.s.

\* Le quantità di biomassa sono espresse come sostanza secca (s.s.)

\*\* E' espresso in ore lavorative (2 operai impiegati nella raccolta)

Tabella 5: caratteristiche e produzioni dei vigneti (2007)

Vigneto	Età (anni)	Larghezza filare (m)	Superficie (ha)	Biomassa prodotta (t/ha)
1 Trebbiano	4	2	0,66	1,77
2 Pinot grigio	8	3	1,77	0,88
3 Chardonnay	7	2,5	1,83	0,85
4 Merlot	18	3,5	1,22	0,11
5 Cabernet e Sangiovese	8	2,5	3,51	0,67

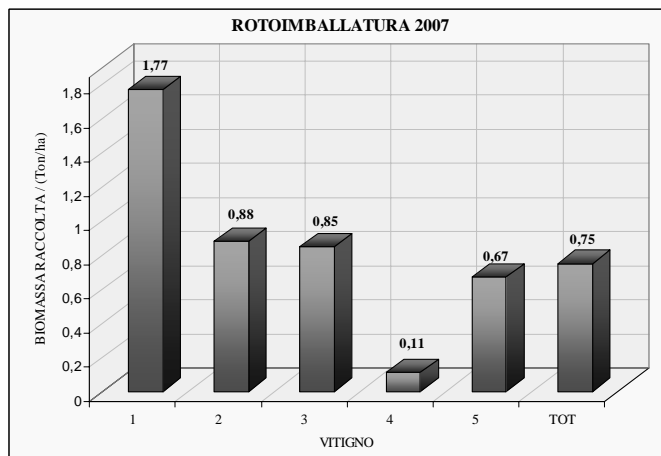


Figura 5: Produzione vitigni 2007

Tabella 6: Risultati principali campagna 2007

Area cantiere	8,99 ha
Produzione raccogliabile *	1,09 t s.s./ha
Produzione raccolta *	0,75 t s.s./ha
Perdite	0,34 t s.s./ha (31%)
Tempo impiegato **	2,04 h/t s.s.
Consumo gasolio	5,47 lt/t s.s.
Costo rotoimballatura ***	15,46 €/t s.s.

\* Le quantità di biomassa sono espresse come sostanza secca (s.s.)

\*\* E' espresso in ore lavorative (1 operaio impiegato nella raccolta)

\*\*\* Al netto del costo evitato del trattore munito di rastrello (25€/ha)

Come era lecito aspettarsi, la rotoimballatura del 2007 ha fornito risultati nettamente superiori all'anno precedente; la produzione raccolta è passata da 0,49 a 0,75 tonnellate di sostanza secca per ettaro (53% di produzione in più); il costo della fase di rotoimballatura è passato da 8,7 €/q a 1,55 €/q.

Nella tabella 7 il risultato ottenuto dall'ultima campagna, calcolato in funzione della sostanza secca prodotta, indicato come Lungarotti, può essere confrontato con alcuni studi disponibili in letteratura.

Tabella 7: Confronto risultati con dati di letteratura

Raccolta	Modello Macchina	Numero operatori	Produzione (t/ha)	u.r. (%)	Costo (€/t)
Lungarotti	Lerda T110	1	0,75	0	15,46
Ancona [3]	Lerda 900L	2	1,99	44	45,00
Ancona [3]	Caeb MP400S	1	2,26	44	23,00
Cosenza[4]	Arbor RS170	1	3,70	50	39,60*
Chieti [5]	Lerda 1000	2	4,20	32	34,00*

\* Non è stato sottratto il costo evitato del trattore munito di rastrello

Il risultato ottenuto è, in termini di costi della sola fase di rotoimballatura, sensibilmente inferiore agli studi disponibili; i punti di forza che hanno reso possibile tale risultato sono principalmente:

- esecuzione della potatura su filari alternati, che ha consentito sia il dimezzamento dei tempi di raccolta, sia una riduzione delle perdite in quanto la maggiore quantità di potature ha permesso una maggiore facilità della raccolta;
- riduzione del numero di operatori sul cantiere da due ad uno, che ha consentito il dimezzamento dei costi relativi alla manodopera;
- modifiche alla macchina rotoimballatrice, che hanno consentito sia la riduzione dei tempi morti dovuti ad inceppamenti della macchina, sia la possibilità di eseguire la raccolta nei filari di larghezza 2 e 2,2 metri.

### 3. TRASPORTO, STOCCAGGIO ED ESSICCAZIONE DELLE ROTOBALLE

La scelta tecnologica di impiego di una rotoimballatrice anziché una trinciataricatrice è stata preferita, come confermato da alcuni studi, per la facilità di stoccaggio e per la migliore facilità di conservazione rispetto al cippato sciolto, che tende invece a fermentare; al contrario si incontrano maggiori problemi nella successiva fase di impiego delle rotovalle come biocombustibile. [6]

Le rotovalle sono state raccolte in testa ai filari e trasportate in un unico punto di stoccaggio. Il luogo di stoccaggio, all'aperto, è stato scelto in un'area di proprietà dell'azienda stessa, distante circa 6 Km dalla centrale termica a biomasse; la scelta di uno stoccaggio relativamente distante dalla centrale si è reso necessario a causa della mancanza di spazio nelle immediate vicinanze della centrale stessa; tale logistica determina una ulteriore fase di trasporto dallo stoccaggio al silos della centrale termica, con ulteriore appesantimento dei costi di produzione del biocombustibile. Nella figura 6 è riportata una foto dell'area di stoccaggio delle rotovalle.

La scelta di realizzare uno stoccaggio naturale all'aperto si è rivelata molto utile per l'essiccazione della biomassa: essa infatti, in base alle analisi di laboratorio eseguite, è passata da un'umidità relativa del 38-40% alla raccolta, fino al 5-6% nei mesi di Luglio e Agosto, per poi risalire lentamente al 10-12% nei mesi di Novembre e Dicembre. Pertanto anche l'essiccazione naturale all'aperto produce buoni risultati, anche se si è osservato che a distanza di 1 anno dalla raccolta il materiale è in fase di degradamento.



Figura 6: Area di stoccaggio delle rotovalle

Tabella 8: Tempi e costi della fase di trasporto

TRASPORTO CAMPO-AREA DI STOCCAGGIO	
Tempo necessario	2,4 h/t
Costo	54,48 €/t
TRASPORTO STOCCAGGIO-CENTRALE TERMICA	
Tempo necessario	0,5 h/t
Costo	9,60 €/t
<i>Costo totale fase di trasporto</i>	<i>64,08 €/t</i>

Per quanto riguarda il trasporto è stata monitorata la fase di trasporto dal campo all'area di stoccaggio, mentre è stata eseguita una stima dei costi necessari alla fase di trasporto dall'area di stoccaggio al silos adiacente alla centrale termica. Per tale fase sono state impiegate attrezzature e macchinari già in possesso dell'azienda, in particolare una forca per la raccolta delle rotovalle, un carrello agricolo per il trasporto ed una pinza idraulica per la sistemazione in cataste delle rotovalle. La tabella 8 mostra i tempi necessari e i costi sostenuti. Come si può facilmente notare la fase di trasporto risulta economicamente dispendiosa, anche in rapporto ai dati di letteratura che, per percorsi complessivi inferiori ai 25 Km, forniscono valori di riferimento di circa 20-25€/t. [7]

La fase di trasporto necessita pertanto di ottimizzazione della logistica al fine di rendere competitivo il prezzo della biomassa.

### 4. CIPPATURA E IMMAGAZZINAMENTO

La fase di cippatura delle rotovalle rappresenta l'anello di chiusura della filiera agroenergetica, in quanto consente di ottenere un biocombustibile di dimensioni omogenee, il cippato, utilizzabile dalle caldaie a biomasse disponibili in commercio.

Le elevate dimensioni delle rotovalle (1,0 m di diametro x 1,1 m di altezza), se da un lato consentono una facile raccolta in testa ai filari, non sono però compatibili con le dimensioni della bocca di carico delle cippatrici di piccola o media taglia ottimali per questa taglia di impianto; l'impiego di una cippatrice forestale, più adatta alla cippatura di grossi tronchi o rotovalle, non sarebbe stata economicamente sostenibile all'interno del progetto di filiera. Pertanto è stato sperimentato l'impiego di un carro miscelatore, normalmente utilizzato nel settore dell'alimentazione zootecnica, che ha un costo di acquisto paragonabile a quello di una cippatrice di taglia medio-piccola. Le prove di cippatura sono state eseguite su un carro miscelatore Storti modello Bulldog 15 m<sup>3</sup> le cui caratteristiche principali sono riportate nella tabella 9. La figura 7 mostra l'interno del cassone miscelatore, nel quale sono state introdotte da un muletto le rotovalle, che sono state successivamente triturate dal sistema di coltelli rotanti della macchina. Il cippato ottenuto ha una granulometria media di circa 5-7 cm, abbastanza grossolano ma compatibile con il sistema di combustione a griglia mobile scelto nel progetto.

Tabella 9: Caratteristiche carro miscelatore

Lunghezza massima	603 cm
Larghezza massima	248 cm
Peso	6650 Kg
Capacità cassone miscelatore	15 m <sup>3</sup>
Potenza richiesta al trattore	80 hp



Figura 7: Vista interna del carro miscelatore

Il materiale cippato in uscita dal carro miscelatore sarà trasportato all'interno del silos di stoccaggio finale del cippato mediante un nastro trasportatore azionato elettricamente con potenza assorbita di circa 2 kW.

Anche per questa fase, l'ultima prima della conversione energetica in caldaia, sono stati stimati i tempi ed i costi, riepilogati nella tabella 10.

Tabella 10: Tempi e costi della fase di cippatura ed immagazzinamento

Durata ciclo cippatura e immagazzinamento	2 h
N° rotoballe lavorate ogni ciclo	20
Biomassa lavorata ogni ciclo	2 t s.s.
Consumo gasolio trattore	5,25 lt/t s.s.
Consumo di energia elettrica (muletto 20 kW + nastro trasportatore 3 kW)	6 kWh/t s.s.
Numero operatori	1
Costo cippatura e immagazzinamento	26,78 €/t s.s.

Anche questa fase presenta costi abbastanza contenuti, ulteriormente migliorabili nel caso si riesca ad automatizzare o quantomeno semplificare la fase di caricamento delle rotoballe all'interno del carro miscelatore, l'unica in cui è strettamente necessaria la presenza attiva di un operatore.

## 5. CONVERSIONE ENERGETICA

Le caratteristiche principali del sistema di conversione energetica e della rete di distribuzione scelta sono:

- silos di stoccaggio del cippato, di volume utile pari a circa 60 m<sup>3</sup>, in grado di garantire un'autonomia della caldaia di almeno 8 giorni nelle condizioni di carico più gravose;
- sistema di trasporto del cippato dal silos alla camera di combustione costituito da rastrelli mobili sul fondo del silos e coclee di caricamento fino alla caldaia;
- tecnologia della caldaia a griglia mobile, che consente una maggiore elasticità di impiego in termini di umidità e granulometria del materiale, fattori come già osservato abbastanza variabili in funzione della stagione o della durata del ciclo di cippatura;
- taglia dell'impianto, pari a 400 kW utili, scaturita da un compromesso tra i fabbisogni energetici dell'azienda e

la quantità di energia ottenibile dalla raccolta dei sarmenti di vite;

- fluido termovettore impiegato: olio diatermico fino a 300°C, affinché la temperatura raggiunta consenta di impiegare macchine ad assorbimento per la produzione di acqua refrigerata fino a -10°C, necessaria ai processi di vinificazione; inoltre l'olio diatermico consentirà la produzione di vapore necessario al processo di sterilizzazione delle bottiglie;
- impiego di un prototipo di gruppo frigo ad assorbimento ad olio diatermico per la produzione di acqua refrigerata fino a -10°C, marca Robur modello GA ACF 60-00 LB Power Fluid, potenza frigorifera resa pari a 13 kW;
- Impiego di scambiatori olio diatermico-acqua calda e olio diatermico-vapore per la distribuzione alle utenze dell'energia necessaria.

La conversione energetica della biomassa consentirà la produzione di energia nelle seguenti forme:

- acqua calda per il riscaldamento dei locali e per la produzione di acqua calda sanitaria;
- acqua refrigerata fino a -10°C per il processo di vinificazione;
- acqua a 7°C per il condizionamento estivo dei locali dell'azienda;
- vapore per i processi di sterilizzazione.

Dalle prove di raccolta delle potature relative all'anno 2007 è stato stimato un quantitativo di biomassa pari a circa 150 tonnellate annue. Inoltre, dalle analisi eseguite in laboratorio per la caratterizzazione chimico-fisico-energetica della biomassa, è risultata una umidità media durante l'anno del 12%, con potere calorifico inferiore pari a 17300 KJ/Kg, (4,8 kWh/Kg); pertanto l'energia annua disponibile è pari a circa 720 MWh.

La stima dei fabbisogni energetici dell'azienda (376 MWh termici per le caldaie e 1010 MWh elettrici per i gruppi frigoriferi), ha determinato la decisione di scartare l'allaccio di alcune caldaie risultate poco utilizzate e comunque troppo distanti dalla centrale termica a biomasse.

Per quanto riguarda i gruppi frigoriferi a compressione invece, la disponibilità di un'unica macchina ad assorbimento consentirà inizialmente un modesto risparmio sui consumi elettrici dell'azienda.

La tabella 11 descrive i consumi annui di combustibile ed i risparmi conseguibili nella configurazione attuale, la tabella 12 riassume l'analisi economica dell'investimento nell'ipotesi di installare ulteriori cinque macchine frigorifere ad assorbimento. Appare evidente come l'ottimizzazione di alcune fasi della filiera energetica, riducendo il costo di produzione della biomassa, ridurrebbe sensibilmente il tempo di ritorno dell'investimento.

Tabella 11: Consumi stimati e risparmi energetici conseguibili

Consumo gasolio	30.000 l/anno
Consumo GPL	11.000 l/anno
Consumo elettrico per gruppi frigo	1010 MWh/anno
Risparmio gasolio	28.000 l/anno
Risparmio GPL	5.000 l/anno
Risparmio energia elettrica	18 MWh/anno
Risparmio economico annuo (compresi i certificati bianchi)	35.000 €/anno

Tabella 12: Analisi economica dell'investimento

Costo realizzazione impianto	210.000 €
Costo annuo produzione cippato	100 €/t
Risparmio economico annuo	45.000 €/anno
Ricavo annuo (al netto delle spese)	30.000 €/anno
Tempo di ritorno dell'investimento	8-9 anni
Durata dell'impianto	12 anni

## 6. CONCLUSIONI

Il costo di produzione del cippato relativo a tutta la filiera energetica è stato stimato pari a circa 106 €/t s.s., suddiviso nelle diverse fasi elencate nella figura 8.

Le fasi ad oggi messe a punto, che hanno raggiunto risultati molto incoraggianti, sono quelle di raccolta, stoccaggio e cippatura delle rotoballe.

La fase che necessita di ottimizzazione risulta indubbiamente la fase di trasporto, sia dal campo allo stoccaggio all'aperto, sia da questo al silos della centrale termica; si può notare infatti come questa fase incida sui costi per circa il 60% dell'intera filiera, rendendo il costo totale del cippato non ancora pienamente competitivo con altre tipologie di cippato provenienti da altri settori (S.R.F., scarti industrie del legno, manutenzioni boschive e del verde pubblico).

I risultati conseguiti consentono già ad oggi un tempo di ritorno dell'investimento di circa 8-9 anni, avendo a disposizione ancora ampi margini di miglioramento.

È attualmente in fase di realizzazione:

- la centrale termica completa di tutte le apparecchiature di sicurezza e di controllo;
- il silos di stoccaggio del cippato completo dei sistemi di movimentazione della biomassa (rastrelli, nastri, coclee);
- la rete impiantistica di distribuzione dei fluidi termovettori;
- le sottocentrali di allaccio agli impianti esistenti complete di scambiatori di calore.

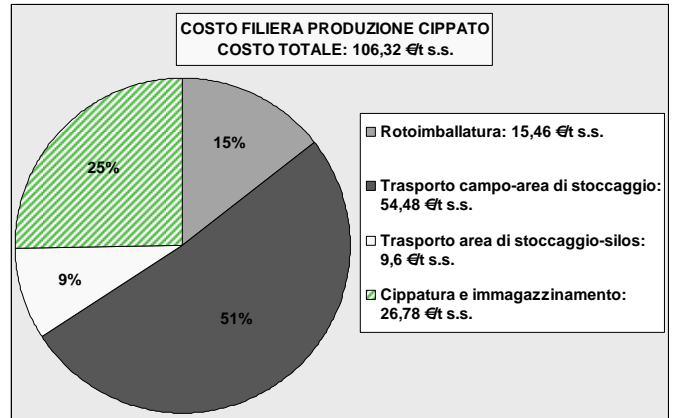


Figura 8: Costo delle varie fasi della filiera di produzione del cippato.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. F. Cotana and I. Costarelli, Impianti Sperimentali per il Recupero Energetico da Potature di Vite, Olivo e Frutteti, *Recupero Energetico*, Perugia, 2005.
2. E. Foppa Pedretti, G. Riva, B. Serafini and V. Scrosta, La Gestione dei Residui delle Trasformazioni Agroalimentari, *AIIA*, 2001
3. R. Spinelli, C. Nati, N. Magagnotti and V. Civitarese, Produrre Biomassa dai Sarmenti di Vite, *L'Informatore Agrario*, vol. 28, pp 36-39, 2006.
4. L. Pari and F. Sissot, Prove di Raccolta di Cascami di Vite e Pesco con Imballatrice Arbor RS 170, *L'Informatore Agrario*, vol. 12, pp 87-90, 2001.
5. R. Spinelli and R. Spinelli, L'Imballatura dei Residui Legnosi Agroforestali, *L'Informatore Agrario*, vol.46, pp 59-62, 1998.
6. M.Lazzari, L'Approvvigionamento delle Biomasse agli Impianti di Conversione, *AIIA*, 2003
7. G. Riva, J. Calzoni and A. Panini, Impianti a Biomasse per la Produzione di Energia Elettrica, *Comitato Termotecnico Italiano*, 2000.

## **PROGETTO BIOMASSE: ENERGIA RINNOVABILE PER LE AZIENDE AGRICOLE DERIVANTE DA REFLUI ZOOTECNICI (ERAARZ)**

Daniele Giraldi, Gianluca Cavalaglio, Sara Massoli, Simona Servili

Centro Ricerca sulle Biomasse (CRB), via Michelangelo Iorio n°8 06128 Perugia

### **SOMMARIO**

Nello scenario energetico nazionale, una sempre maggior importanza viene data alle fonti energetiche rinnovabili e “pulite”; in questo contesto si inseriscono alcune proposte relative alla microgenerazione distribuita, soprattutto presso le aziende agricole e gli allevamenti distribuiti sul territorio nazionale.

Questo lavoro riguarda una possibile soluzione progettuale particolarmente adatta per le piccole-medie aziende agricole che hanno a disposizione sia reflui zootecnici sia biomasse di origine vegetale (come ad esempio insilato di mais).

Dopo una descrizione del processo di digestione anaerobica e delle possibili soluzioni impiantistiche presenti in letteratura e sul territorio europeo, è descritto l’assetto produttivo dell’azienda selezionata per la sperimentazione e la descrizione dell’impianto sperimentale che è in fase di realizzazione.

Obiettivo della ricerca è quello di assemblare, sperimentare ed ottimizzare una soluzione impiantistica di facile realizzazione e dall’assetto gestionale semplificato, in maniera tale da poter essere diffusa e replicata su scala nazionale.

### **INTRODUZIONE**

Il progetto ERAARZ, presentato con modalità a sportello al Ministero delle Politiche Agricole e Forestali nel Dicembre 2005, in base a quanto previsto dal DM 16 Luglio 2003 è stato ammesso a finanziamento nel febbraio 2006.

Il progetto ERAARZ si inserisce nella filiera del recupero energetico degli scarti di lavorazione di un’azienda agricola umbra impiegando la digestione anaerobica come processo di valorizzazione energetica dei reflui zootecnici.

Il Centro di ricerca sulle Biomasse si è attivato per la realizzazione di un simile progetto a fronte di una attenta analisi dello stato dell’arte degli impianti di digestione anaerobica dei reflui zootecnici che ha evidenziato la mancanza di soluzioni impiantistiche di piccola taglia nonostante il problema dello smaltimento dei reflui sia una vera e propria emergenza specialmente nei piccoli-medi allevamenti.

#### **1. IL PROCESSO DI DIGESTIONE ANAEROBICA**

La digestione anaerobica è un processo termochimico che, in assenza di ossigeno, permette di ottenere un biogas composto principalmente da metano ed anidride carbonica; tale reazione avviene anche spontaneamente, per esempio in cumuli di sostanza vegetale tal quale. La percentuale di metano presente nel biogas varia tra il 50% e l’80% a seconda delle tipologie di biomasse impiegate e del tipo di processo determinando un diverso potere calorifico variabile tra 4.500 Kcal/m<sup>3</sup> e 6.500 Kcal/m<sup>3</sup>.

La biomassa in ingresso deve avere le seguenti caratteristiche:

- umidità maggiore del 50%;

- rapporto di carbonio ed azoto compreso tra 20 e 30;
- pH compreso tra 6.4 e 7.2;
- basso rapporto tra lignina e cellulosa;
- nel caso si tratti di reflui zootecnici bisogna verificare l’assenza di componenti antibiotiche derivanti da cure mediche dei capi;
- assenza di fenoli [1].

Queste caratteristiche del substrato in ingresso sono fondamentali per la creazione delle famiglie di microrganismi necessari per la realizzazione del processo: l’acqua del substrato permette agli organismi di “spostarsi” all’interno del substrato stesso e costituisce una vera e propria “casa”, un rapporto non ottimale di C/N comporta problemi di inibizione del processo dal momento che solitamente l’azoto presente in soluzione è in fase ammoniacale (urea presente nei reflui), il pH è un indice di stabilità del processo, la lignina non costituisce un nutrimento per i batteri e quindi risulta non digeribile dall’impianto con conseguente bassa efficienza di processo [2].

I microrganismi presenti nel substrato realizzano il processo di digestione anaerobica principalmente in due stadi: durante il primo stadio avviene una trasformazione delle sostanze complesse in composti intermedi, come l’acido acetico e l’idrogeno, che costituiranno nel secondo stadio il substrato idoneo per l’accrescimento delle famiglie di microrganismi metanigeni.[3] Di seguito si riporta uno schema più dettagliato di tutte le fasi del processo di digestione anaerobica con i relativi substrati, i prodotti ed i batteri che ne caratterizzano la reazione (figura 1).

Gli stadi di processo possono essere anche realizzati in un’unica fase all’interno di uno stesso digestore; in questo caso, ovviamente, il reattore assume una configurazione più complicata in quanto vanno garantite le condizioni ottimali di crescita delle diverse famiglie di microrganismi. [4]

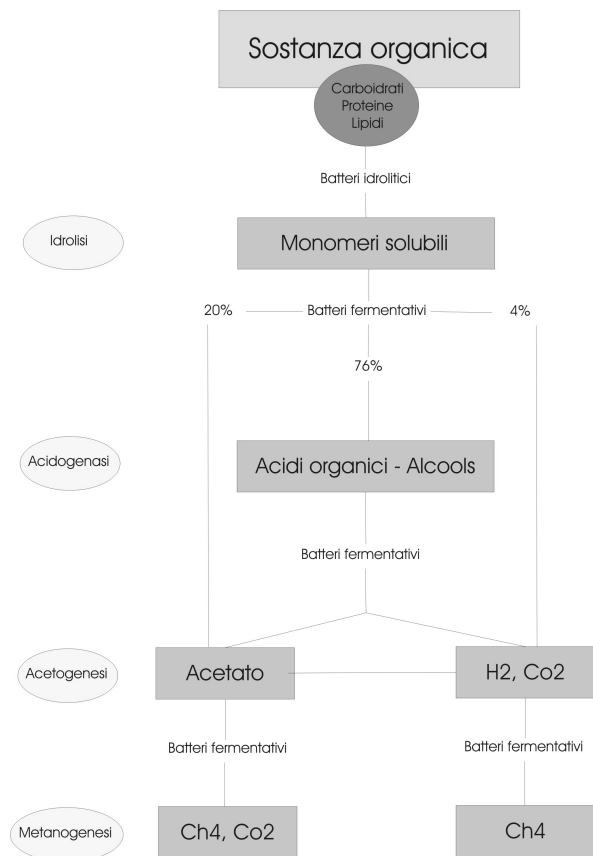


Figura 1: Stadi del processo di digestione anaerobica

### 1.1 Tipologie di processo

A seconda delle diverse temperature di processo, ovvero della temperatura a cui viene mantenuto il reattore, si ha la formazione di diverse categorie di microrganismi.

Se la temperatura di processo è compresa tra 15°C e 25°C si ha la formazione di batteri psicrofili, tra 25°C e 45°C si ha la formazione di batteri mesofili, tra 45°C e 55°C di batteri termofili.

In base alla temperatura di processo, il processo di digestione anaerobica ha dei tempi di ritenzione diversi all'interno del reattore: per impianti semplificati in psicrofilia dai 30 ai 90 giorni, impianti in mesofilia dai 15 ai 35 giorni, in termofilia dai 15 ai 20 giorni [5]. I differenti processi hanno costi di gestione ed efficienze diversi, come riportato in tabella 1.

Una ulteriore differenziazione di processo si ha per la percentuale di sostanza secca presente nel substrato: si parla di digestione a secco qualora la percentuale di sostanza secca sia superiore al 20%, digestione umida per substrato con il 10% di sostanza secca, digestione a semisecco nei casi intermedi. [6]

### 1.2 Tecnologie impiantistiche

In base alla quantità ed al tipo di reflui disponibili ed in base alla tipologia di processo scelta, esistono diverse tipologie impiantistiche per la realizzazione di un impianto di digestione anaerobica.

Le soluzioni impiantistiche più semplici sono quelle delle vasche e lagune riscaldate o non riscaldate; la differenza è che la seconda tipologia viene realizzata direttamente nel terreno, previa impermeabilizzazione, ed ha dimensioni molto più ragguardevoli. Le vasche, invece, possono essere realizzate sia fuori terra che parzialmente interrate.

Tabella 1: Caratteristiche dei processi di digestione anaerobica in mesofilia e termofilia

Tipo	Costi di gestione	Efficienza (biogas/substrato)	Carico organico in input
Mesofilia	Medi	Media	Medio
Termofilia	Alti	Alta	Alto

Il recupero del biogas affiorante in superficie è in genere affidato a materassi galleggianti in PVC e telo, oppure a tubazioni di captazione tenute in depressione per mezzo di un compressore esterno, che aspirano quanto viene prodotto sotto la copertura (figura 2).

Questi reattori comportano delle problematiche di processo in quanto sprovvisti di sistema di agitazione, che permette di omogeneizzare il liquame all'interno della vasca, e di sistemi di riscaldamento efficaci, date le grandi dimensioni soprattutto delle lagune; inoltre i solidi presenti nel refluo tendono a solidificare ed a formare una sorta di crosta rigida che nel peggiore dei casi può comportarsi da accumulo di biogas.

La seconda tipologia di reattore è il CSTR (Completely Stirred Reactor - reattore a miscelazione completa, figura 3), costituita da una vasca di forma cilindrica, dimensionata opportunamente in base ai volumi e alle sostanze da trattare, in

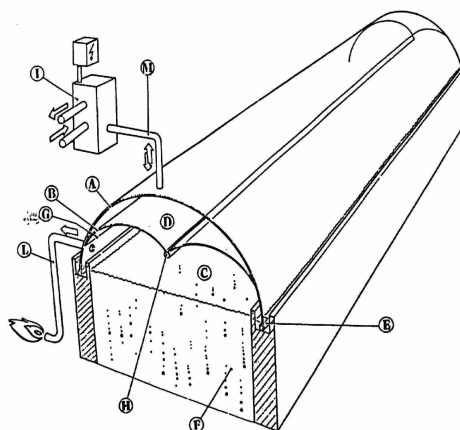


Figura 2: Esempio di reattore a vasca; A copertura impermeabile; B membrana di separazione; C camera del biogas; D Camera aria; E ancoraggio; F vasca liquami; G giunzione tra membrana e copertura; H zavorra membrana; I pompa dell'aria; L uscita gas; M tubo dell'aria (fonte Ecomembrane)

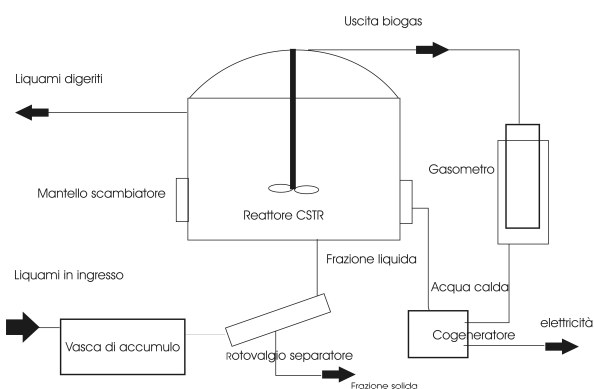


Figura 3: Esempio di reattore CSTR

cui un sistema di agitazione determina un continuo rimescolamento del materiale interno alla vasca, garantendo una uniformità di caratteristiche. La digestione anaerobica avviene in mono-stadio e questo ne determina una maggior economicità a fronte di una minor resa in biogas e di inconvenienti nella purificazione dei reflui.

L'ultima tipologia di reattori mono-stadio è rappresentata dalla classe dei plug-flow reactor (PFR) che consistono in una vasca prismatica in cui la dimensione longitudinale è di gran lunga prevalente sulle altre, come si può apprezzare dalla figura 4. Il PFR è il reattore a più alto rendimento e può trattare liquami a più alto contenuto di solidi, e non richiede, anzi, rifiuta la miscelazione, in modo che il refluo avanzi lentamente lungo la vasca, con concentrazioni di batteri e nutrienti costanti in ogni sezione e variabili gradualmente sezione per sezione, fino a ottenere quelle desiderate, nella sezione terminale.

Esistono anche reattori PFR abbinati ad agitatori meccanici nel caso in cui il contenuto di solidi sia inferiore al 13%.

L'impianto del progetto pilota oggetto di questo lavoro è una evoluzione della tipologia PFR che permette di ridurre le dimensioni e di garantire rendimenti ancora ottimali. [7]

### 1.3 Tipologie di biomasse in input

Di seguito si riportano le stime delle quantità di biogas producibili con la fermentazione anaerobica a partire da diversi materiali residuali organici.

Come si può notare dalle tabelle 2 e 3 la resa in biogas dei reflui zootecnici non è fra le più elevate e rappresenta meno della metà del biogas producibile con equivalenti quantità di insilato di mais. Il rovescio della medaglia sta nel fatto che una digestione di solo insilato avrebbe tempi di attivazione lunghissimi visto che il substrato non è idoneo per la formazione delle famiglie batteriche.

Da notare la resa particolarmente elevata delle acque di lavaggio dei frantoi (OMW – Olive Mill waste Water), circa 360 m<sup>3</sup> di biogas per m<sup>3</sup> di OMW; il problema nell'utilizzo di tali sottoprodotti di lavorazione sta nella presenza di fenoli, che inibiscono il processo di digestione, e nella disponibilità

Tabella 2: Caratteristiche di alcune delle possibili biomasse in input in % di s.s.

Materiale	Contenuto s.s. (%)	Sostanza organica (% s.s.)	Resa di biogas (m <sup>3</sup> /t s.organica)
<b>Allevamenti</b>			
Liquame bovino	6 - 11	68 - 85	200 - 260
Letame bovino	11 - 25	65 - 85	200 - 300
Liquame suino	2,5 - 9,7	60 - 85	260 - 450
Letame suino	20 - 25	75 - 90	450
Liquame avicolo	10 - 29	75 - 77	200 - 400
Letame avicolo	32,0 - 32,5	70 - 80	400
<b>Agricoltura</b>			
Insilato di mais	34	86	350 - 390
Insilato d'erba	26 - 82	67 - 98	300 - 500
Paglia	85 - 90	85 - 89	180 - 600
Stocchi di mais	86	72	300 - 700
<b>Agro-industria</b>			
Scarti vegetali	5 - 20	76 - 90	350
Melasse	80	95	300
Siero	4,3 - 6,5	80 - 92	330



Figura 4: Esempio di digestore PFR

Tabella 3: Rese in biogas di alcune delle possibili biomasse in input per unità di volume

Prodotto	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (t)	Biogas (m <sup>3</sup> )
Liquame bovino	1	1	15
Letame bovino	1	0,3	10,1
Liquame suino	1	1	15,6
Letame suino	1	0,3	23,5
Liquame avicolo	1	1	44,5
Letame avicolo	1	0,3	29,3
Insilato di mais	1	0,625	67,6
Insilato d'erba	1	0,5	89
Paglia	1	0,04	12
Stocchi di mais	1	0,4	123,8
Scarti mele	1	0,3	2,6
Melasse	1	0,3	68,4
Siero	1	1	15,3
Scarti vegetali	1	0,4	14,5
Scarti frantoi	1	0,5	357

esclusivamente stagionale, circa 90 giorni all'anno; inoltre, alla fine del processo di digestione, il digestato ha ancora un forte carico di azoto che va obbligatoriamente abbattuto con metodologie tradizionali. [6]

## 2. IMPIANTI ESISTENTI SUL TERRITORIO EUROPEO ED ITALIANO

Impianti di digestione anaerobica sono molto diffusi in Europa specialmente nei paesi del nord, come la Germania; in Svezia il 10% del biogas prodotto viene purificato ed utilizzato per autotrazione di quasi 6000 veicoli (dato riferito al 2004) con un risparmio in termini di benzina di circa 360.000 litri all'anno.

Per avere un quadro completo della situazione europea si riporta la stima degli impianti di digestione anaerobica riferiti all'anno 2006:

- circa 1.600 impianti operativi nella stabilizzazione dei fanghi di depurazione;
- circa 400 impianti per il trattamento delle acque reflue industriali ad alto carico organico;
- circa 450 impianti di recupero del biogas in discarica;
- circa 130 impianti da RSU e/o residui organici industriali;
- oltre 2.500 impianti da reflui zootecnici di cui il 80% in Germania (di questi più del 90% opera in codigestione); in Svezia esistono anche 7 impianti che utilizzano sottoprodotti di origine animale; in alcune zone dell'Austria il biogas viene immesso nella rete di distribuzione del gas metano.

In Italia alla fine del 2004 risultavano attivi circa 100 impianti di produzione di biogas. [4]

### 3. IMPIANTO SPERIMENTALE

L'impianto sperimentale oggetto del progetto è in corso di realizzazione presso l'azienda agricola Poggiovalle; i terreni dell'azienda, di oltre 1.800 ettari, ricadono tra i Comuni di Città della Pieve e Fabro.

#### 3.1 Caratteristiche aziendali

L'attuale assetto produttivo dell'azienda, prevede l'allevamento di circa 140 vacche nutrici di razza chianina per la produzione di vitelli da carne, lasciate libere al pascolo per sei mesi l'anno, di 130 vacche di razza frisona per la produzione di latte e di circa 90 manze e vitelli. La produzione giornaliera di liquami dell'azienda, sulla base dei capi disponibili, è pari a  $12 \text{ m}^3$ .

Per quanto riguarda la produzione di biogas, mediamente si possono ottenere  $0,750 \text{ m}^3$  di biogas al giorno dal liquame prodotto da una vacca da latte del peso vivo medio di 500 kg: nel caso in esame, considerando 130 capi bovini di 400 kg, 90 da 350 kg e 140 da 600 kg, la produzione di biogas stimata dell'azienda è pari a circa  $270 \text{ m}^3/\text{giorno}$  di biogas.

L'azienda dispone inoltre di parecchi ettari coltivati a seminativo e quindi può facilmente avere a disposizione insilato di mais per attuare un processo di codigestione.

#### 3.2 Soluzione impiantistica proposta

Ricerche di letteratura hanno portato all'individuazione di una tipologia di reattore modulare e flessibile, di facile installazione e con manutenzione ridotta: si tratta di un reattore ad asse orizzontale di tipo plug-flow che lavora in condizioni di termofilia. [1] [3]

Il cuore dell'impianto, ovvero il reattore, è realizzato in estrusione rotativa di Polipropilene (PP) in doppia parete; una tale configurazione orizzontale permette di avere minori costi di manutenzione in quanto eventuali solidi vengono trascinati sul fondo del reattore e di conseguenza espulsi con il digestato, evitando così la formazione di croste come descritto in precedenza. La doppia parete permette di mantenere le condizioni ottimali di temperatura mediante l'impiego dei gas di scarico della sezione di valorizzazione energetica del biogas (figura 5).

Il reattore è composto da 2 di questi tubi in Polipropilene per garantire da una parte lo smaltimento di una maggior parte dei reflui prodotti in azienda, dall'altra permettere il trasporto

reattore avranno un diametro di circa 2,30 m ed una lunghezza di 13,52 m così da garantire il rispetto della sagoma d'ingombro del rimorchio per il trasporto. Il volume utile all'interno dei tubi risulta essere  $\frac{3}{4}$  del volume totale poiché almeno  $\frac{1}{4}$  deve essere lasciato libero per l'espansione e l'accumulo del biogas. Questa prima sezione di digestione riuscirà a smaltire circa la metà dei reflui giornalieri ( $6 \text{ m}^3$  su un totale di  $12 \text{ m}^3$ ) con tempo di ritenzione di 15 giorni dato dalla pendenza orizzontale dei tubi di circa  $1^\circ$ . I tubi sono appoggiati su delle culle e l'intera struttura è realizzata sopra una platea in rete metallica elettrosaldata.

Come già descritto in precedenza nella sezione di presentazione delle tecnologie, un impianto di tipo plug-flow non necessita di agitatore meccanico in quanto di solito utilizzato con materiali ad elevata percentuale di sostanza solida; per questo impianto pilota, però, si sono studiate soluzioni tecnologiche per la realizzazione di un agitatore elicoidale parallelo all'asse del digestore che ruoti a bassissima velocità sia a favore di corrente che controcorrente in maniera tale da poter inserire biomasse con meno sostanze solide e/o regolare meccanicamente il tempo di ritenzione del digeribile. Questa soluzione tecnologica è compatibile con biomasse in input avente una percentuale di sostanze solide minore del 13%.

Le componenti ausiliare al reattore sono posizionate su di una griglia metallica posta sopra il reattore; in particolare queste sezioni ausiliare sono costituite dalle unità di depurazione del biogas (deumidificatore e desolfatore), dai serbatoi di accumulo dell'acqua calda, da eventuali pannelli solari per soddisfare il carico termico necessario al processo, da un gasometro per l'accumulo del biogas, da una torcia di sicurezza per la termodistruzione del biogas in esubero.

Per quel che concerne la sezione di valorizzazione energetica del biogas sono ancora al vaglio due soluzioni progettuali: la prima è costituita da un motore a biogas che garantisce rendimenti elevati (circa il 40%) a scapito di maggiori costi di manutenzione dovuti principalmente all'usura delle componenti del sistema d'iniezione; la seconda costituita da una turbina a biogas che permette di recuperare una maggior quantità di calore con costi di manutenzione minori, ma maggiori costi d'impianto e minor rendimento elettrico (circa 25%). Nel caso in cui venga preferita la turbina, questa verrà alloggiata sempre con le attrezzature delle sezioni ausiliare, mentre il motore verrà alloggiato a lato del digestore in apposito container cofanato ed insonorizzato.

#### 3.3 La sperimentazione

La sperimentazione riguarda innanzitutto la messa a punto dell'impianto attraverso una precisa analisi dei flussi di massa ed energia nelle sezioni di digestione anaerobica e di valorizzazione energetica del biogas.

Per ottimizzare i periodi di accrescimento delle famiglie batteriche sia nella fase di avvio sia in successivi periodi di fermo del digestore, si procederà all'inoculo di famiglie batteriche selezionate nelle diverse fasi del processo di digestione; in questo modo i tempi per il raggiungimento delle condizioni di regime ottimali saranno molto più brevi.

La soluzione impiantistica proposta è stata concepita per attuare un processo di codigestione con biomasse erbacee: principalmente viene utilizzato l'insilato di mais in quantità iniziale di 100 Kg al giorno. La sperimentazione proseguirà inizialmente con l'aumento della percentuale di insilato in codigestione per poi svilupparsi nella ricerca di biomasse erbacee alternative, quali trinciato di sorgo non essiccato, e dei

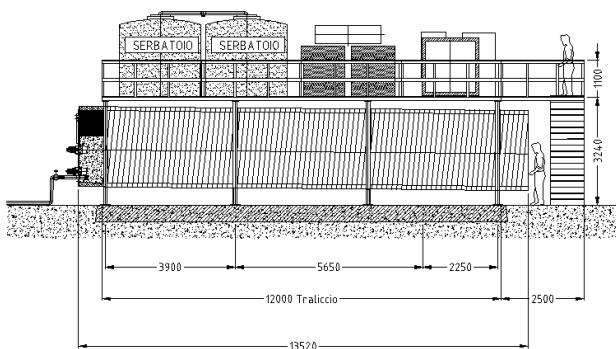


Figura 5: Schema dell'impianto sperimentale di digestione anaerobica

su strada senza particolari autorizzazioni: di fatti i tubi del

loro mix ottimali per l'ottimizzazione della quantità e della qualità di biogas prodotto. A tale proposito, il CRB dispone di un piccolo reattore da laboratorio di tipo Batch con il quale sono già state effettuate delle prove sperimentali per determinare la resa in biogas di diversi mix di biomasse (figura 6). In particolare sono stati analizzati rendimenti della digestione di diverse tipologie di alghe del Lago Trasimeno, frazione organica di rifiuti solidi urbani (FORSU), reflui bovini e reflui avicoli. [8] Questo digestore servirà per valutare le rese dei diversi mix di biomassa che verranno introdotti nel digestore non solo per ricercare quello a maggior efficienza ma anche per verificare che lo spazio di espansione del biogas all'interno del reattore sia sufficiente, evitando così problemi di tenuta o di rottura del reattore stesso.

#### 4. CONCLUSIONI

L'impianto descritto può essere una soluzione impiantistica di facile diffusione e replicabilità.

La modularità dell'impianto fa sì che la taglia possa essere facilmente calibrata sulle reali esigenze dell'allevamento senza precludere sviluppi futuri dell'azienda: infatti, se il numero dei capi dell'azienda aumentasse in maniera considerevole, basterebbe aggiungere ulteriori linee di digestione anaerobica senza dover ricorrere alla realizzazione di imponenti opere civili, come nel caso dei digestori tradizionali.

La possibilità di realizzare la codigestione di biomasse erbacee permette di aumentare sensibilmente la resa di biogas del processo e, di conseguenza, permette di diminuire il tempo di ritorno dell'investimento.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. V. Nallathambi Gunaseelan "Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review" *Biomass and Bioenergy* Vol.13 (1997), pag 83-114
2. K.V. Rajeshwari\*, M. Balakrishnan, A. Kansal, Kusum Lata, V.V.N. Kishore "State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 4 (2000), pag. 135-156
3. A.N.P.A. Agenzia Nazionale Protezione Ambientale, O.N.R Osservatorio Nazionale Rifiuti "Il trattamento anaerobico dei rifiuti" 2002.
4. S. Piccinini, G. Bonazzi, D. Sassi, M. Soldano, F. Verzellesi, *Energia dal biogas – soluzioni possibili per l'azienda, Il Divulgatore*, Anno XXVIII n°12, 2005.
5. H. Bouallagui, Y. Touhami, R. Ben Cheikh, M. Hamdi "Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes" *Process Biochemistry* 40 (2005) pag. 989–995.
6. A.A.V.V., *Energia dal biogas prodotto da effluenti zootecnici, biomasse dedicate e di scarto*, C.R.P.A. , Reggio Emilia, 2007.
7. A.A.V.V., *Biomasse per l'energia – guida per progettisti, impiantisti ed utilizzatori*, ISES Italia, pp. 67-118, 2004.
8. G. Bidini, F. Cotana, C. Buratti, F. Fantozzi, I. Costarelli, *Il digestore anaerobico da laboratorio del centro di ricerca sulle biomasse*, atti del 61° congresso nazionale ATI, vol. II, pp. 587-591, 2006.



**SESSIONE**

**CLIMA E CAMBIAMENTI  
CLIMATICI**



## REVIEW ON CLIMATE SYSTEM FEEDBACKS

Paolina Bongioannini Cerlini

Università degli Studi di Perugia, Piazza Università 1, Perugia  
cerlini@fisica.unipg.it

### SOMMARIO

I processi all'interno del sistema climatico conducono a meccanismi retroattivi ('feedbacks') che possono amplificare o smorzare la risposta del clima a perturbazioni esterne di tipo naturale (es: eruzioni vulcaniche, variazione della attività solare, variazioni orbitali) o antropico (es: cambiamento nella concentrazione di gas serra e aerosol). Tale risposta può essere quantificata attraverso la stima della sensibilità climatica ('climate sensitivity') ovvero di quanto cambia la temperatura superficiale media di equilibrio del pianeta al variare di una o più forzanti esterne. Esistono varie stime di sensibilità climatica ed esse dipendono in maniera critica dalla corretta valutazione dei feedback radiativi associati al vapor acqueo, alle nubi, al ghiaccio marino e terrestre e alle variazioni dei profili verticali di variabili fondamentali quali, per esempio, temperatura e umidità.

Questi feedback vengono valutati utilizzando modelli di circolazione generale (GCM) e pertanto vengono stimati in maniera differente a seconda del modello che viene utilizzato. In questo lavoro ci si propone di fornire una review dei concetti di clima, feedback climatici e di come essi vengono rappresentati negli attuali modelli di circolazione generale.

### INTRODUZIONE

La comprensione delle questioni scientifiche che coinvolgono il clima terrestre si basa sulla esistenza di modelli matematici e di teorie fisiche che vengono applicate alla previsione del clima futuro e, sulla base dei risultati che questi modelli forniscono, alla interpretazione scientifica dei dati climatologici.

Infatti se la misura con metodologie moderne (che implicano stima dell'accuratezza della misura e riproducibilità dei dati che risultato delle previsioni) dei dati fisici che caratterizzano il clima risale alle prime previsioni meteorologiche fatte per scopi militari durante la II Guerra Mondiale, vi è una abbondante quantità di dati fisici e chimici che derivano dai record geologici che vengono usati da una branca della scienza del clima chiamata paleoclimatologia, per dedurre a quali variazioni sia stato soggetto il clima terrestre nel corso del tempo.

Questa ricerca ha già fornito un risultato molto importante: oggi noi sappiamo che il clima della Terra è cambiato varie volte durante gli ultimi tre milioni di anni e ciò è avvenuto molto rapidamente e radicalmente durante alcune fasi della storia geologica, come i carotaggi dei ghiacci polari hanno rivelato. Una possibile causa è stata identificata nelle oscillazioni periodiche dell'orbita terrestre che modificano l'orientazione dell'asse terrestre a cui corrisponde l'oscillazione tra periodi glaciali ed interglaciali del clima. Questo mostra una sensibilità del clima terrestre non tanto alla quantità della luce solare assorbita dalla Terra quanto alla sua distribuzione latitudinale, a cui sembra seguano le oscillazioni tra periodi glaciali ed interglaciali.

Questo meccanismo è un importante esempio di feedback climatico dove ad una variazione di un parametro climatico (modifica della distribuzione latitudinale della luce solare

dovuta ad una variazione dell'orbita), corrisponde una diminuzione di un altro parametro climatico (la luce solare intercettata dalle regioni artiche) a cui segue una riduzione dello scioglimento dei ghiacci e della neve che porta alla glaciazione.

Il sistema climatico sembra essere quindi estremamente sensibile ai molteplici meccanismi di retroazione tra le sue componenti e questa sensibilità lo porta ad oscillare continuamente ed evolvere su diverse scale spazio-temporali. Sfortunatamente queste oscillazioni non sono indipendenti tra loro e possono interagire in modo non lineare sulle scale di variazione. Quindi è essenziale per la previsione delle variazioni climatiche stabilire quali feedback guidino l'evoluzione del sistema climatico e su quali scale temporali e spaziali.

Questo articolo mira a fornire una review generale del concetto di clima, di feedback climatico, dei principali feedback che ad oggi sembrano guidare le previsioni climatiche nei modelli (General Circulation Models, GCMs) e delle strategie usate per paragonare le previsioni e i dati climatici osservati.

Riferimento di base sarà il Third Assessment Report (TAR) dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) e gli ulteriori sviluppi ottenuti in campo climatico.

### IL SISTEMA CLIMATICO

#### Definizione

Il sistema climatico è un sistema fisico complesso termodinamicamente chiuso ma non isolato, in grado cioè di scambiare energia (ma non materia) con lo spazio esterno.

Possiamo pensarlo composto da cinque sottosistemi

termodinamicamente aperti: Atmosfera, Oceano, Litosfera, Biosfera, Criosfera. I cinque sottosistemi componenti sono sistemi eterogenei termodinamici e sono caratterizzati in base alla loro composizione chimica e ai loro stati termodinamici e meccanici. Gli stati termodinamici sono generalmente definiti dal valore di alcune variabili intensive quali temperatura, pressione, umidità specifica, energia specifica, densità e salinità. Gli stati meccanici sono definiti a loro volta da altre variabili intensive che caratterizzano il moto, quali forze e velocità.

Le interazioni tra i sottosistemi componenti il sistema climatico e tra la Terra ed il forcing esterno ad essa (la radiazione solare) da cui il sistema trae energia, vengono rappresentate da equazioni differenziali alle derivate parziali in cui l'atmosfera, gli oceani e le masse di ghiaccio sono rappresentate come continui descritti da un campo di variabili, ognuna delle quali ha dominio su un numero praticamente infinito di gradi di libertà. Si assume di poter scrivere in forma esatta l'insieme di equazioni che governa i valori quasi istantanei di tutte le variabili che descrivono il sistema climatico. In realtà siamo interessati a valori delle variabili mediati su un certo intervallo di tempo  $\Delta t = \delta$ . La differenza tra l'intervallo di tempo su cui vengono mediati i valori e la distribuzione statistica associata alle variabili considerate definisce il clima. Infatti se le variabili vengono mediate su un intervallo dell'ordine di alcune ore (scala temporale sinottica) tali medie definiscono valori istantanei del sistema. Ciò che costituisce la successione temporale di tali valori viene definito tempo meteorologico (weather) che è quindi costituito dallo stato completo del sistema ad un determinato istante. Prevedere il tempo significa, perciò, prevedere l'evoluzione di un tale stato istantaneo.

Se i valori delle variabili descrittive del sistema vengono invece mediati su di un intervallo di tempo considerevole, non possono più essere considerati come valori istantanei ma rappresentano il momento di ordine uno della distribuzione statistica associata alle variabili considerate.

La definizione di clima consiste nell'insieme di tutte le proprietà statistiche del sistema Terra-Atmosfera durante un periodo di tempo sufficientemente lungo. La previsione climatologica deve quindi determinare come questa statistica cambi durante il corso del tempo.

### Sensibilità climatica e parametri di feedback

Dalla definizione di clima discendono alcune fondamentali conseguenze. I modelli che vengono usati per le previsioni climatiche forniscono soluzioni che devono essere confrontate con i dati climatici osservati. Il vincolo costituito dalla esistenza di valori climatici osservati a cui raffrontare la statistica dei modelli vale per tutta la gerarchia di modelli, dai GCM a quelli semplificati, che sono stati usati per testare i feedback climatici conosciuti.

In particolare si definisce *sensibilità climatica* la variazione globalmente mediata della temperatura superficiale terrestre al raddoppio della concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub>. Tale valore viene calcolato con la sua incertezza relativa (valore medio  $\pm$  dev. std.) per ogni variabile climatica.

Infatti ogni variabile climatica che risponde ad una variazione della temperatura media superficiale attraverso processi fisici o chimici e che direttamente o indirettamente modifica il bilancio radiativo terrestre può costituire un feedback climatico. In termini esatti il concetto di feedback è stato usato in climatologia per caratterizzare la risposta del sistema climatico ad un forcing radiativo esterno [1].

Se  $T_s$  e  $R$  sono la temperatura media superficiale e il bilancio radiativo terrestre al top dell'atmosfera (TOA):

$$R = (S_0/4)(1-\alpha) - \text{OLR} \quad (1)$$

dove  $S_0$ ,  $\alpha$ , e OLR sono l'insolazione, l'albedo planetaria (ovvero la frazione di luce solare incidente riflessa verso lo spazio senza essere assorbita) e la Outgoing Longwave Radiation al TOA. All'equilibrio risulta  $R = 0$ .

Assumiamo ora che una perturbazione esterna, quale una variazione nella concentrazione del CO<sub>2</sub> o nella costante solare, sia imposta al sistema climatico e disequilibri il bilancio radiativo terrestre di  $\Delta Q$  ( $\Delta Q$  viene chiamato il forcing radiativo). Il sistema climatico risponde a questo sbilancio radiativo cambiando la sua temperatura media globale. Ad ogni istante la variazione dal suo stato imperturbato di equilibrio della temperatura media superficiale  $\Delta T_s$  può essere correlata al forcing radiativo imposto e allo sbilancio radiativo al TOA attraverso l'equazione:

$$\Delta R = \Delta Q + \lambda \Delta T_s \quad (2)$$

dove  $\lambda$  è detto *parametro di feedback* (si noti che i flussi vengono assunti come positivi verso il basso). Il sistema climatico raggiunge l'equilibrio quando  $\Delta R = 0$ .

Quando  $T_s$  varia, molte variabili climatiche variano di concerto. Se queste variabili climatiche variano, modificano l'OLR o l'albedo planetaria, e la loro variazione può modificare  $\Delta R$  e quindi la relazione tra la grandezza del forcing radiativo  $\Delta Q$  imposto e la grandezza della risposta climatica  $\Delta T_s$ . In altre parole esse modificano il parametro di feedback climatico  $\lambda$ .

Sia  $x$  un vettore che rappresenta un insieme di variabili climatiche che fanno variare  $R$ . Un parametro di feedback climatico  $\lambda$  può essere formalmente definito come:

$$\lambda = \frac{\partial R}{\partial T_s} = \sum_x \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial T_s} + \sum_x \sum_y \frac{\partial^2 R}{\partial x \partial y} \frac{\partial x \partial y}{\partial T_s^2} + \dots \quad (3)$$

Il più fondamentale feedback nel sistema climatico è la dipendenza della temperatura dell'emissione ad onda lunga (LW) attraverso la legge di Stefan-Boltzmann dell'emissione di corpo nero (risposta di Planck). Per questa ragione la risposta della temperatura superficiale del sistema climatico viene spesso comparata alla risposta  $\Delta T_{s,p}$  che si otterrebbe se la temperatura fosse la sola variabile a rispondere al forcing radiativo e se la variazione di temperatura fosse orizzontalmente e verticalmente uniforme:  $\Delta T_{s,p} = (\Delta R - \Delta Q) \lambda_p$ .

La variazione della temperatura media superficiale globale che avverrebbe quando tutte le variabili climatiche  $x$  rispondessero ad una variazione di  $T_s$  può essere allora espressa come:  $\Delta T_s = (\lambda_p / \lambda) \Delta T_{s,p}$ . Poiché il parametro di feedback è la somma delle risposte di Planck (o dei parametri di Planck) e di tutti gli altri feedback, al primo ordine si può scrivere (trascurando l'interazione tra i feedback):

$$\lambda = \lambda_p + \sum_{x \neq P} \lambda_x, \text{ dove } \lambda_x = (\partial R / \partial x) (\partial x / \partial T_s). \quad (4)$$

Quindi la variazione superficiale di temperatura può essere espressa come:

$$\Delta T_s = \frac{1}{1 - \sum_{x \neq P} g_x} \Delta T_{s,P} \quad (5)$$

dove:

$$g_x = -(\lambda_x / \lambda_p), \quad g = \sum_{x \neq P} g_x$$

$g_x$  è chiamato *guadagno di feedback* per la variabile  $x$ , essendo  $g$  il guadagno di feedback per tutte le variabili  $x \neq P$ . La quantità  $f = 1/(1 - g)$  viene chiamata *fattore di feedback*. Se  $g$  è positivo (negativo),  $\Delta T_s \geq \Delta T_{s,P}$  ( $\Delta T_s < \Delta T_{s,P}$ , rispettivamente). Il parametro di feedback di Plance,  $\lambda_P$ , è negativo cioè un aumento della temperatura comporta un incremento dell'emissione ad onda lunga (LW) verso lo spazio e quindi riduce il bilancio radiativo  $R$ . Il tipico valore di  $\lambda_P$  per l'atmosfera terrestre viene stimato dai calcoli dei GCM (Coleman [2]; Soden e Held [3]) a circa  $-3.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Un valore di  $-3.8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  si ottiene, invece, definendo semplicemente  $\lambda_P$  come  $-4\sigma T_s^3$ , eguagliando l'OLR media globale a  $\sigma T^4$  e assumendo un'emissione alla temperatura di 255 K, con  $\sigma =$  costante di Stefan-Boltzmann. Quindi, per ogni variabile  $x \neq P$  il segno del guadagno di feedback  $g_x$  è il segno del parametro di feedback  $\lambda_x$ . Sulla base di questa convenzione, un parametro di feedback positivo (negativo) amplifica (smorza) la risposta in temperatura del sistema climatico ad un forcing radiativo prescritto e aumenta (riduce) la sensibilità climatica.

## COSA ABBIAMO IMPARATO SUL CLIMA DAL PASSATO?

### Feedback climatici planetari ed ere glaciali

La datazione delle ere glaciali è basata sulla datazione degli strati di ghiaccio che viene fatta nelle carote prelevate sulle piattaforme glaciali. Infatti tali strati segnano i cicli stagionali della caduta della neve e del suo scioglimento nelle piattaforme. Inoltre il rapporto tra la massa degli isotopi di ossigeno nel ghiaccio dei carotaggi in Groenlandia e nel continente antartico fornisce un buon indicatore della temperatura durante la formazione dei ghiacci.

In Figura 1 viene mostrata la ricostruzione della temperatura superficiale terrestre media durante gli ultimi 4.5 milioni di anni fatta sulla base di due famosi carotaggi antartici. Si vedono alcune oscillazioni di più di 6 K che segnano l'oscillazione tra ere glaciali ed interglaciali e che corrispondono alla oscillazione della massa totale dei ghiacci fatta attraverso gli isotopi dell'ossigeno contenuti nei sedimenti di foraminifera bentica.

Come visto in precedenza, i dati paleoclimatici hanno portato alla formulazione della teoria che spiega l'oscillazione delle ere glaciali ed interglaciali sulla base dell'oscillazione dei parametri dell'orbita terrestre (oscillazione dell'asse terrestre) e alla sensibilità del sistema climatico a variazioni anche piccole della distribuzione della luce solare con la latitudine. Nella fase interglaciale la Terra era libera da ghiacci come durante il primo Eocene (50 milioni di anni fa) durante il quale alberi giganti crescevano su un'isola attorno al Polo Nord, mentre durante la fase glaciale la Terra sembra essere stata interamente coperta da ghiacci in varie epoche attorno a 500 milioni di anni fa. Tra questi estremi il pianeta era eccezionalmente caldo. Nell'atmosfera terrestre che si riscalda, il più efficace gas serra è costituito dal vapor acqueo

che, più calda è l'atmosfera, più si accumula. All'aumentare del vapore, più calore rimane intrappolato in atmosfera innescando un feedback positivo che porta al riscaldamento terrestre. Se questo feedback non trova altri meccanismi che lo controbilancino, può portare all'evaporazione totale degli oceani e l'atmosfera terrestre diviene più o meno come quella di Venere che, oltre ad avere un'atmosfera composta quasi interamente da  $\text{CO}_2$  (96%), ha una temperatura media superficiale di circa  $480^\circ \text{C}$ , cosa che rende il pianeta un inferno da *super effetto serra*.

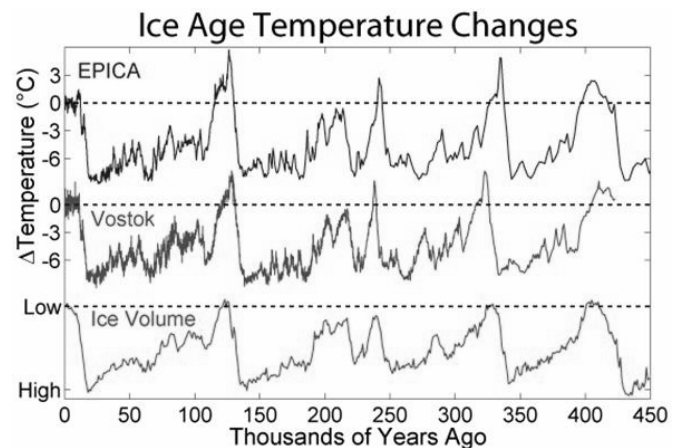


Figura 1: Ricostruzione delle variazioni della temperatura superficiale terrestre durante gli ultimi 4.5 milioni di anni (alcune glaciazioni). Le curve verde e blu si riferiscono a 2 carotaggi fatti nell'Antartico, tali ricostruzioni si basano sugli isotopi del deuterio. La curva rossa in basso mostra il volume dei ghiacci totale (attraverso  $^{18}\text{O}$  nei sedimenti di foraminifera bentica).

Cosa ha impedito che la Terra divenisse un inferno di fuoco? La composizione dell'atmosfera cambiò dalla atmosfera primigenia, frutto delle emissioni vulcaniche, grazie alla consumazione chimica del  $\text{CO}_2$  e alla produzione di ossigeno innescata dai processi biologici dovuti alle prime forme di vita. Cambiando la composizione chimica, l'effetto serra netto scemò compensando il lento ma inesorabile aumento della costante solare. In seguito, la vita primigenia alterò in maniera drammatica il pianeta, l'uomo è solo la specie vivente più recente a fare la stessa cosa.

### Effetto serra

Come mostra il breve schema della storia climatica della Terra, l'effetto serra gioca un ruolo basilare sul clima terrestre e i fenomeni che alterano il clima non possono essere compresi se non si comprende quale ruolo la fisica dell'effetto serra abbia nel sistema Terra-Atmosfera.

Come visto nel calcolo della sensibilità climatica, l'emissività della superficie terrestre segue la legge di Stefan-Boltzmann che permette di calcolare la radiazione emessa dalla Terra in risposta alla radiazione solare assorbita come:

$$E = \sigma T_s^4 \quad (4)$$

dove  $E$  è l'emissione equivalente di corpo nero. Poiché l'aria terrestre è composta quasi interamente di molecole di ossigeno ed azoto che lasciano passare la radiazione solare entrante ad onda corta (con una lunghezza d'onda media di

circa 1 micron) e la radiazione ad onda lunga uscente (OLR a circa 15 micron di lunghezza d'onda media) dalla superficie terrestre, per calcolare la temperatura media superficiale terrestre basterebbe semplicemente bilanciare attraverso l'emissione (raffreddamento) ad onda lunga l'assorbimento (riscaldamento) della luce solare. Questo produrrebbe una temperatura superficiale media di circa  $-17.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , che è un valore ben lontano dalla temperatura media superficiale terrestre di  $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Fortunatamente per noi l'atmosfera contiene tracce di quantità di altre sostanze gassose che interagiscono fortemente con la radiazione. La prima di queste è l'acqua che, a causa della sua complessa geometria molecolare, assorbe ed emette radiazione in maniera molto più efficiente dell'ossigeno e dell'azoto molecolare. In atmosfera l'acqua esiste in fase gassosa (vapore acqueo) ed in fase condensata (acqua liquida e ghiaccio) sotto forma di nubi e precipitazione.

Il vapore acqueo e le nubi assorbono la radiazione solare e ad onda lunga, e le nubi riflettono la radiazione solare verso lo spazio. La quantità di vapor acqueo in una particella di aria varia grandemente a seconda della posizione e dell'istante considerato ma in nessun caso supera il 2% della massa totale.

La concentrazione di acqua in atmosfera è soggetta ad un altro limite fisico fondamentale: la quantità massima di vapore ( $e^*$  = pressione di vapor saturo) che è contenuta in una particella d'aria dipende da pressione e temperatura e aumenta in maniera esponenziale all'aumentare della temperatura. Considerando il rapporto tra la quantità reale di umidità contenuta in una particella e il valore del vapore di saturazione si determina l'umidità relativa  $H$ . È stato dimostrato da calcoli fatti con molti GCM e dalle osservazioni, che l'umidità relativa rimane pressoché costante durante i cambiamenti climatici.

Questo significa che, poiché la temperatura atmosferica cresce, anche la quantità di vapor acqueo in atmosfera cresce. Ma poiché il vapor acqueo è un gas serra, un aumento di vapore porta ad un successivo aumento di temperatura innescando quindi un feedback positivo. Questo feedback è la ragione principale per cui ci si aspetta che la temperatura superficiale cresca di più di quanto un raddoppio del  $\text{CO}_2$  produrrebbe.

Altri gas interagiscono fortemente con la radiazione: il  $\text{CO}_2$ , che attualmente è circa 380 tonnellate per ogni milione di tonnellate di aria, e il metano,  $\text{CH}_4$  (circa 1.7 tonnellate per ogni milione di tonnellate di aria). Se nell'insieme i gas serra sono circa trasparenti alla luce solare, permettendo alla radiazione ad onda corta di raggiungere senza impedimenti la superficie terrestre, dove essa viene in gran parte assorbita (ma le nubi riflettono ed assorbono la luce solare), molta della radiazione ad onda lunga emessa dalla superficie terrestre viene assorbita da questi stessi gas. Per compensare il riscaldamento che questo assorbimento provoca, i gas serra devono emettere radiazione ed ogni strato dell'atmosfera emette dunque radiazione infrarossa verso l'alto e il basso.

### Bilancio radiativo terrestre

Come risultato la superficie della Terra riceve radiazione dall'atmosfera come pure dal Sole. È da notare il fatto che, mediando su tutta la Terra, la superficie terrestre riceve più radiazione dall'atmosfera che *direttamente* dal Sole. Per bilanciare questo input extra di radiazione (la radiazione emessa dai gas serra e dalle nubi) la superficie terrestre deve riscaldarsi e quindi emettere più radiazione essa stessa. Questa è l'essenza dell'effetto serra.

In Figura 2 viene mostrato il bilancio energetico medio terrestre in termini di energia radiativa assorbita ed emessa (in  $\text{W m}^{-2}$ ) come calcolato da Kiehl e Trenberth [4]. Sul lungo termine, la quantità di radiazione solare assorbita dalla Terra e dall'atmosfera ( $342\text{ W/m}^2$ ) viene bilanciata dalla stessa quantità di radiazione ad onda lunga (OLR) rilasciata dal sistema Terra-Atmosfera e dalla luce solare riflessa direttamente.

Circa metà della radiazione solare entrante viene assorbita dalla superficie terrestre ( $168\text{ W/m}^2$ ), questa energia viene ritrasferita all'atmosfera per riscaldamento (thermals) dell'aria a contatto con la superficie che viene sollevata verso l'alto e continuamente rimpiazzata da aria fredda proveniente dall'alto.

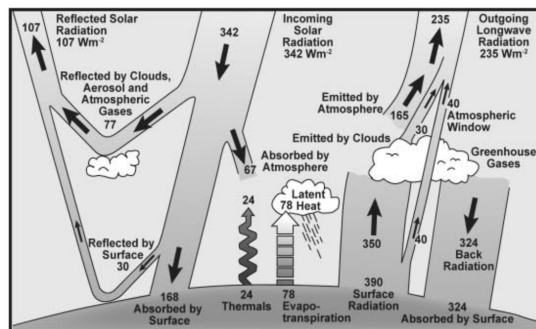


Figura 2: Bilancio energetico terrestre in  $\text{W/m}^2$ , considerando bilanciamento tra energia radiativa entrante e uscente.

Queste correnti convettive abbassano la temperatura superficiale terrestre da un valore di  $29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ad un valore medio di  $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , riscaldando la troposfera sovrastante.

Quindi se l'emissione di radiazione da parte dei gas serra riscalda la superficie terrestre, il movimento dell'aria smorza questo riscaldamento. Inoltre l'energia viene trasferita all'atmosfera anche per evapotraspirazione e per emissione ad onda lunga.

Il vapor acqueo e le nubi sono state riconosciute come le più importanti sostanze serra del sistema climatico, come oramai accettato largamente dalla ricerca climatologica attraverso le stime fatte dai GCM della sensibilità climatica all'equilibrio.

Il problema dei feedback climatici radiativi riguarda quelle variabili climatiche che modificano direttamente il bilancio radiativo al top dell'atmosfera (TOA). Queste variabili, inoltre, rispondono direttamente attraverso la temperatura superficiale soprattutto attraverso processi fisici piuttosto che chimici o biologici.

Principalmente di questi processi, che rivestono importanza rispetto alla determinazione dell'influenza antropogenica sul clima, ci vogliamo qui occupare. I feedback radiativi sono associati con l'interazione del bilancio radiativo con il vapor acqueo, le nubi, la variazione in verticale della temperatura (lapse rate), e l'albedo superficiale ed hanno un impatto largamente accettato sulle stime fatte dai GCM della sensibilità climatica all'equilibrio.

Infatti la quantità e la distribuzione del vapor acqueo in atmosfera è importante sia perché amplifica la risposta in temperatura del clima sia perché determina la distribuzione delle nubi che giocano un ruolo fondamentale nel sistema climatico. Da una parte esse riflettono circa il 22% della radiazione solare incidente raffreddando il pianeta. D'altro canto le nubi assorbono la radiazione solare ed emettono ed

assorbono al contempo radiazione infrarossa contribuendo così' al *global warming*.

I feedback relativi alle nubi sono stati riconosciuti come i maggiori responsabili dell'incertezza relativa alle previsioni climatiche anche senza considerare le interazioni fra nubi ed aerosol [5,6].

Rimane comunque certo che i feedback associati alla risposta in temperatura del ciclo del carbonio, degli aerosol, dei gas in traccia, dei processi oceanici e della variazione dell'umidità del suolo, possano avere un impatto sostanziale sulla grandezza, sulla tempistica e la distribuzione spaziale del riscaldamento climatico.

## IL PROBLEMA CLIMATICO

### Variabilità naturale e forzata

La sensibilità climatica dipende in maniera critica dalla grandezza dei feedback climatici e la stima che i GCM ne fanno differisce grandemente. La comprensione dei meccanismi fisici che determinano la stima della grandezza dei feedback climatici è la base per il miglioramento delle future proiezioni climatiche.

Assieme a questo, la determinazione della differenza tra variazioni climatiche naturali libere (ovvero interne al sistema) o forzate (ovvero esterne al sistema) è il passo fondamentale per riuscire a misurare l'influenza dovuta alle attività umane.

Poiché le attività umane precedenti all'epoca industriale non hanno immesso quantità significative di gas serra e aerosol in atmosfera, se potessimo stimare le variazioni climatiche precedenti a questa epoca, avremmo idea di come il clima varia naturalmente. Qui sta uno dei punti più delicati relativi al *problema clima*: i dati precedenti alle misurazioni fatte a partire dalla metà del XX secolo non sono precisi come sarebbe necessario per affrontare il problema. I dati che ad oggi possiamo ricavare con una certa affidabilità della misura per variabili come la temperatura sono derivati da misure indirette come, ad esempio, la misurazione degli anelli degli alberi, e possono essere considerati approssimazioni fatte con un certo grado di affidabilità dei valori delle variabili climatiche. Usando i dati misurati e le approssimazioni derivate si sono ricostruite le temperature medie per periodi di più di 1000 anni. Il risultato di queste ricostruzioni, che sembra inequivocabile, è che la crescita della temperatura media superficiale durante l'ultimo periodo del secolo ad oggi è senza precedenti. Questa è l'affermazione che il TAR dell'IPCC ha fatto sin dal 2001.

La Figura 3 mostra la ricostruzione basata su dati strumentali della temperatura media superficiale. Da qui si può vedere come la temperatura media superficiale è cresciuta di  $0.6 (\pm 0.2) ^\circ\text{C}$  dal 1860 al 2000 [7]. La crescita è avvenuta principalmente nei periodi 1910-45 e 1960-2000 e le variazioni regionali corrispondenti a questi due periodi sono diverse.

Un altro modo di estendere queste previsioni climatiche in modo da rivelare la differenza tra variazioni forzate e libere è quello di simulare il clima per lunghi periodi (100 anni e più). Oltre alla complessità dei modelli climatici e della loro soluzione, il problema è reso più complesso dalla risoluzione numerica con cui è possibile simulare con i modelli il clima su tutta la Terra. Tale risoluzione si è abbassata fino a circa 250 km in orizzontale e 1 km in verticale in atmosfera e ulteriormente in oceano.

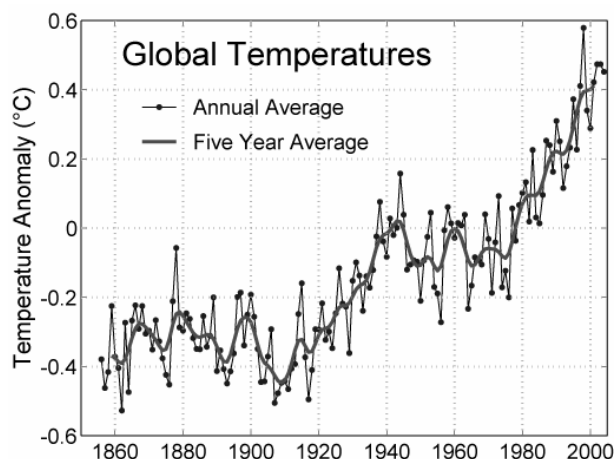


Figura 3: Serie storica della temperatura media superficiale globale: ricostruzione effettuata sulla base di dati strumentali a cura dell'University of East Anglia e dell'Hadley Centre (UK). Dataset documentato in Jones and Moberg [7].

Il problema delle simulazioni è che molti importanti processi avvengono su scale ancora inferiori alla risoluzione dei modelli numerici. La rappresentazione di questi processi avviene con quelle che vengono chiamate parametrizzazioni nei modelli, e coinvolge appunto parametri che vengono aggiustati in modo da far funzionare i modelli in modo ottimale. Cosa significa far funzionare un modello climatico?

Significa far riprodurre al modello un clima ragionevolmente vicino alla realtà misurata. I modelli climatici in questo senso non sono lontani dai modelli di previsione meteorologica, sia perché condividono molte parametrizzazioni di processi climatici fondamentali (ad esempio quelli relativi alle nubi, al vapore acqueo ed in generale ai processi la cui fisica è un fattore oramai assodato scientificamente), ma anche perché questi ultimi devono ogni giorno venire verificati sulla previsione del tempo meteorologico, che in questo modo fornisce un formidabile test per la loro validità.

In maniera analoga il test più ovvio per i modelli climatici è quello di riprodurre il clima attuale incluse alcune modalità di variabilità tipiche come i *modi* di variabilità interannuale e decadale.

Sono infatti conosciuti alcuni modi di variabilità naturale della circolazione atmosferica, oceanica e accoppiati come la North Atlantic Oscillation (NAO), la Southern Oscillation-El Niño (ENSO) e altri, che giocano un ruolo fondamentale nel clima globale e nella sua variabilità naturale. La più forte fluttuazione climatica su scala interannuale è ENSO mentre la NAO è uno dei modi dominanti della circolazione extra-tropicale ed è un modo di variabilità dell'atmosfera che coinvolge l'intero sistema troposfera/stratosfera e oceano. Inoltre i modelli climatici debbono riprodurre in maniera ragionevole le variazioni stagionali.

D'altronde sebbene modi di variabilità naturale come El Niño possono causare variazioni nella temperatura globale media per periodi relativamente brevi, una larga porzione della variazione globale media superficiale della temperatura nel XX secolo è stata causata da cause esterne al sistema come le esplosioni vulcaniche, (Pinatubo nel 1991 e del Monte Agung nel 1963) che immise nell'alta troposfera polveri riflettenti, e l'immissione antropogenica di aerosol e gas serra.

Questi controlli della validità dei modelli e il vincolo dei dati sono in grado di ridurre l'incertezza che accompagna le previsioni climatiche e la sensibilità climatica, ma

ciononostante un grado più o meno variabile di incertezza accompagna le previsioni climatiche. Tale incertezza può essere stimata fino ad un certo grado paragonando le previsioni e la stima della sensibilità climatica dei vari modelli, con le relative parametrizzazioni.

In ogni caso noi assumiamo nel fare ciò che il clima reale sia contenuto nelle proiezioni che vengono prodotte dai modelli e all'interno della incertezza che i modelli mostrano per i feedback climatici.

Gli esperimenti condotti finora hanno dimostrato che non si può riprodurre il clima osservato degli ultimi 30 anni se non si include nel forcing variabile nel tempo applicato ai modelli sia l'effetto delle forzanti naturali (aerosol dovuti alle eruzioni vulcaniche che una variazione della costante solare), che le forzanti esterne di origine antropica (aerosol e gas serra di origine antropica). Questo è l'argomento base per cui si crede che l'influenza antropica sul clima sia ora emersa dal rumore di background della variabilità naturale.

## CONCLUSIONI

Le conclusioni del TAR dell'IPCC riguardanti ciò che sappiamo sui cambiamenti climatici partono dall'esistenza, associata tra gli scienziati, di alcune certezze sui fattori che determinano la sensibilità climatica responsabile della variazione della temperatura media superficiale terrestre.

In particolare:

a) le concentrazioni dei gas serra (anidride carbonica, metano, ozono, e ossido di azoto) sono cresciute a causa dell'uso di combustibili fossili e della combustione delle biomasse;

b) le concentrazioni di alcuni aerosol antropogenici sono anch'esse cresciute a causa dell'attività industriale;

c) la temperatura superficiale media è cresciuta di 0.6 °C nell'ultimo secolo, con molto dell'aumento tra il 1920 e il 1950, e di nuovo intorno al 1975. Il 2005 è stato l'anno più caldo secondo il record strumentale;

d) il livello del mare è salito durante l'ultimo secolo e negli ultimi quaranta anni;

e) l'estensione media annuale geografica del ghiaccio artico è diminuita dal 15 al 20% da quando sono cominciate le misure da satellite.

Più discussi sono i feedback fondamentali che sono ritenuti responsabili del cambiamento climatico ed in particolare il fatto che la crescita della temperatura media globale sia dovuta

primariamente alla accresciuta concentrazione dei gas serra.

Questa crescita interagisce con gli altri feedback climatici conosciuti ad oggi e la cui sorgente maggiore di incertezza viene attribuita ai feedback relativi alle nubi. Data la complessità del sistema climatico e la difficoltà di stimare tutti i feedback e le interazioni che possono indurre variazioni climatiche, la stima dell'effetto netto che l'influenza antropica ha sul clima è relativamente incerta.

La breve review qui fatta di alcuni dei concetti fondamentali riguardanti il clima ne ha trascurati altri (come la caoticità del sistema climatico) altrettanto fondamentali, la cui conoscenza sta cambiando la capacità di fare previsioni sia climatiche che meteorologiche.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy, e J. Lerner, Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms, in *Climate Processes and Climate Sensitivity* (J.E. Hansen e T. Takahashi, Eds.). Geophysical Monograph, vol. 29, pp. 130-163. American Geophysical Union. Washington, D.C, 1984.
2. Colman R., A comparison of climate feedbacks in general circulation models, *Climate Dyn.* vol 20, pp.865-873, 2003.
3. B. J. Soden e I. M. Held, An assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models, *J. Climate*, vol. 19, pp. 3354-3360, 2006.
4. J. Kiehl, e K. Trenberth, Earth's annual global mean energy budget, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 78, pp.197-206, 1997.
5. R. D. Cess e Co-authors, Intercomparison and interpretation of cloud-climate feedback processes in nineteen atmospheric general circulation models, *J. Geophys. Res.*, vol. 95, pp. 16 601– 16 615, 1990.
6. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, e C. A. Johnson, Eds., *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, 944 pp, 2001.
7. P. D. Jones e A. Moberg, Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001, *J. Climate*, vol. 16, pp. 206-223, 2003.

## PROTOTIPO DI UN DISPOSITIVO PER IL CONTROLLO DELL'ALBEDO TERRESTRE FINALIZZATO AL CONTENIMENTO DEL RISCALDAMENTO GLOBALE

F. Rossi, F. Cotana, M. Amantini

CIRIAF, Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Sezione di Fisica Tecnica, Via G. Duranti 67, 06125, Perugia

### SOMMARIO

L'incremento delle immissioni nell'atmosfera di gas serra ed in particolare di CO<sub>2</sub> derivanti dalle attività antropiche, concorre all'aumento della temperatura media del nostro pianeta. Secondo il quarto rapporto presentato a Febbraio 2007 a Parigi dall'IPCC infatti la crescita probabile della temperatura del globo da ora alla fine del 2100 sarà tra 1.8 e 4 gradi. La comunità internazionale, avendo preso atto già da tempo della situazione che si andava delineando, ha risposto al problema con una serie di direttive (protocollo di Kyoto) aventi lo scopo di limitare l'immissione di gas climalteranti nell'ambiente e con uno sviluppo tecnologico diretto alla captazione e allo stivaggio della CO<sub>2</sub> e dei gas serra stessi. Recentemente è stata brevettata una nuova tecnologia per il controllo della temperatura media della Terra e conseguente mitigazione dell'effetto serra basata sulla modifica dell'albedo terrestre ossia sull'incremento del coefficiente di riflessione alla luce solare e sull'incremento dell'emissività per temperatura della superficie terrestre stessa. Nel presente lavoro ci si propone di realizzare un prototipo sperimentale che riproducendo il sistema Terra-Universo-Sole e permetta di valutare le variazioni di temperatura sulla superficie terrestre al variare del suo coefficiente di riflessione medio.

### INTRODUZIONE

Negli ultimi 50 anni l'aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera ha prodotto un aumento della temperatura globale media di circa  $0,6 \pm 0,2$  °C. La comunità scientifica, come riportato nel Pannello Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (IPCC) delle Nazioni Unite [1], ritiene che tale aumento di concentrazione sia attribuibile prevalentemente a cause antropiche poiché avvenuto in tempi brevi rispetto ai tempi geologici della Terra. Secondo il quarto rapporto presentato a Febbraio 2007 a Parigi [2] sempre dall'IPCC la crescita probabile della temperatura del globo da ora alla fine del 2100 sarà tra 1.8 e 4 gradi.

Alla luce del rapido e continuo aumento della concentrazione di gas serra e della mancanza di efficaci strumenti sia di carattere tecnico che programmatico in grado di contrastare suddetto fenomeno, risulta ineluttabile la necessità di soluzioni che ostacolino l'incremento della temperatura globale mediante metodi ambientalmente compatibili. Un'alternativa economica e di facile attuazione rispetto alle soluzioni che prevedono la cattura o la riduzione delle emissioni di anidride carbonica e gas serra direttamente sugli impianti tecnologici responsabili di dette emissioni è rappresentata da sistemi e soluzioni tecnologiche che consentano il contenimento del riscaldamento globale mediante l'incremento dell'albedo della terra.

A tale proposito sono stati recentemente depositati due nuovi brevetti n. PG 2006 A 0086 [3] e n. PG 2007 A 0009 [4] riguardanti le suddette tecnologie, di cui si dà una breve illustrazione nel paragrafo che segue, che propongono tra l'altro un metodo matematico per valutare l'effetto del coefficiente di riflessione medio della terra sulla temperatura globale.

Nel presente studio si propone di realizzare un prototipo

sperimentale descrivendone anche un modello di calcolo che riproducendo il sistema **Sole-Universo-Terra** consenta di verificare sperimentalmente le relazioni proposte nei brevetti di cui sopra.

### Descrizione dei brevetti

La temperatura globale media dell'atmosfera terrestre è strettamente collegata alle caratteristiche radiative della superficie della Terra. La porzione di radiazione solare assorbita dalla superficie ed il conseguente riscaldamento prodotto da tale assorbimento costituisce infatti, insieme all'effetto serra indotto dall'atmosfera, il meccanismo alla base del mantenimento della temperatura sulla superficie terrestre su valori idonei all'esistenza della vita animale e vegetale.

In generale, circa il 26% della radiazione solare è riflessa o diffusa di nuovo nello spazio dalle nubi e da altre particelle presenti nell'atmosfera terrestre, il 19% è assorbito dalle nubi, dai gas e dalle particelle presenti nell'atmosfera terrestre, il restante 55% passa attraverso l'atmosfera terrestre raggiungendo la superficie terrestre, e di questa porzione circa il 4% è riflesso dalla superficie terrestre di nuovo nello spazio. In media quindi, circa il 51% della radiazione solare raggiunge la superficie terrestre e qui viene in gran parte assorbita dal terreno producendo il riscaldamento della superficie terrestre e dello strato di atmosfera terrestre più basso. La radiazione solare assorbita dalla superficie terrestre viene riemessa come radiazione con lunghezza d'onda che dipende dalla temperatura della superficie terrestre stessa; poiché tale temperatura è mediamente di 288 K, la radiazione riemessa cade nel campo delle lunghezze d'onda delle radiazioni infrarosse, tra circa 7 e 14  $\mu\text{m}$  (Legge di Wien). Tale radiazione è diretta generalmente verso lo spazio: una parte di

questa energia esce dall'atmosfera, mentre un'altra parte viene assorbita o riflessa di nuovo verso la terra dai gas serra presenti nell'atmosfera terrestre.

L'incremento della concentrazione in atmosfera dei gas serra genera un riscaldamento addizionale dell'atmosfera stessa. La presenza dei gas serra è un fenomeno del tutto naturale senza il quale la temperatura globale media della terra sarebbe di circa  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , invece che  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Nei brevetti in oggetto si propone come soluzione al problema del riscaldamento globale del pianeta l'incremento dell'albedo della Terra mediante la posa in opera di materiali riflettenti con coefficiente di riflessione maggiore rispetto a quello medio della superficie terrestre nelle lunghezze d'onda dello spettro solare ed eventualmente coefficiente di emissività maggiore rispetto a quello della superficie terrestre nell'infrarosso, con conseguente riduzione della porzione di radiazione solare assorbita dalla superficie terrestre e conseguente riduzione della temperatura media dell'atmosfera, senza modificare o alterare la termofluidodinamica e la cinetica dei fenomeni atmosferici. Tale fenomeno può essere conseguito attraverso la posa in opera od il rivestimento di superfici con materiali ad emissività selettiva caratterizzati da eccellenti proprietà di riflessione nelle lunghezze d'onda del visibile ed eventualmente eccellenti proprietà d'emissione nell'infrarosso per consentire un'efficace reirraggiamento del calore assorbito.

L'elemento più innovativo del brevetto n. PG 2006 A 0086 è l'individuazione una relazione matematica che determina il legame tra le caratteristiche radiative nello spettro solare e nell'infrarosso della superficie terrestre e la temperatura media globale. Tale relazione costituisce uno strumento versatile e di rapido impiego per valutare l'influenza delle variazioni delle proprietà di assorbimento della superficie della Terra sulla temperatura atmosferica e conseguentemente per quantificare l'estensione della superficie necessaria a compensare il riscaldamento indotto dall'aumento della concentrazione di anidride carbonica e degli altri gas serra in atmosfera.

La temperatura della Terra può essere stimata con un modello basato su un bilancio energetico tra volta celeste, atmosfera e superficie terrestre. A tale proposito si introduce la grandezza radiosità [5] che esprime la quantità d'energia radiante complessivamente uscente da ciascun corpo per unità di superficie in termini d'energia emessa, riflessa e trasmessa. I tre corpi hanno caratteristiche di emissività selettive ovvero che mostrano diversi valori delle proprietà fotometriche negli intervalli dello spettro solare e dell'infrarosso; in ciascuno di questi due intervalli talune proprietà si considerano costanti seppur diverse tra di loro. Introducendo pertanto le proprietà emissive medie dei corpi nello spettro solare e nell'infrarosso si determina il bilancio energetico in ciascuno degli intervalli di lunghezza d'onda suddetti: per ciascun corpo si introduce il coefficiente di assorbimento medio, il coefficiente di riflessione medio, il coefficiente di trasmissione medio e la radiosità nello spettro solare e nell'infrarosso. A tale proposito l'atmosfera viene considerata come un corpo condensato di spessore infinitesimo e di temperatura pari alla sua temperatura media radiante. In condizioni di regime stazionario, valgono le seguenti ipotesi operative:

- temperatura dei corpi costante;
- proprietà radiative dei corpi uniformi (radiosità uniforme);
- emissione dei corpi perfettamente diffusa;
- l'atmosfera vede per intero la volta celeste e la superficie terrestre;

- la superficie terrestre vede per intero l'atmosfera. Lo schema di riferimento è riportato nella figura seguente.

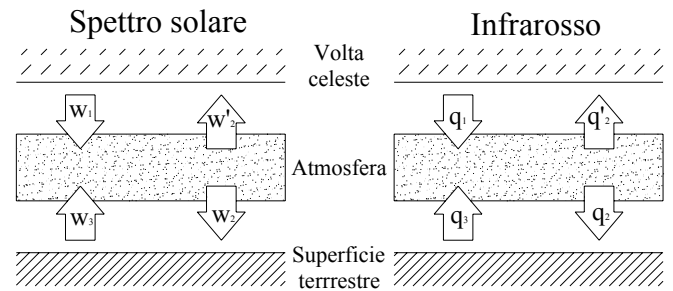


Figura 1: modello basato su un bilancio energetico tra volta celeste, atmosfera e superficie terrestre.

Nello spettro solare l'atmosfera si comporta come un corpo trasparente alla radiazione, mentre la superficie terrestre come un corpo opaco. Il bilancio energetico può essere espresso mediante le relazioni di seguito riportate:

$$\begin{aligned} w'_2 &= w_1 \cdot r_2 + w_3 \cdot t_2 \\ w_2 &= w_1 \cdot t_2 + w_3 \cdot r_2 \\ w_3 &= w_2 \cdot r_3 \end{aligned}$$

Nell'infrarosso, il flusso energetico emesso dalla volta celeste può essere considerato con buona approssimazione nullo. Il bilancio energetico diventa:

$$\begin{aligned} q'_2 &= \sigma_0 \cdot \alpha_2 \cdot T_2^4 + q_3 \cdot \tau_2 \\ q_2 &= \sigma_0 \cdot \alpha_2 \cdot T_2^4 + q_3 \cdot \rho_2 \\ q_3 &= \sigma_0 \cdot \alpha_3 \cdot T_3^4 + q_2 \cdot \rho_3 \end{aligned}$$

I bilanci energetici complessivi per l'atmosfera e la superficie terrestre si ricavano considerando tutti i contributi energetici sia nello spettro solare che nell'infrarosso:

$$\begin{aligned} w_3 + w_1 + q_3 &= w_2 + w'_2 + q'_2 + q_2 \\ w_2 + q_2 &= w_3 + q_3 \end{aligned}$$

Dalla risoluzione del sistema formato dalle otto relazioni precedenti in otto incognite, si ottiene il valore della temperatura della superficie terrestre  $T_3$ ; tale valore dipende dalle caratteristiche fotometriche medie dei corpi che prendono parte allo scambio energetico nello spettro solare e nell'infrarosso.

L'installazione di superfici ad emissività selettiva produce una modifica delle proprietà d'assorbimento medio e d'emissione della superficie terrestre sia nello spettro solare che nell'infrarosso con conseguente variazione della temperatura della superficie terrestre stessa. Le relazioni che ci forniscono, nello spettro solare e nell'infrarosso, il coefficiente d'assorbimento medio in funzione della superficie terrestre ST e della superficie ad emissività selettiva SR sono:

$$\begin{aligned} a'_3 &= [a_3 \cdot (S_T - S_R) + a_R \cdot S_R] / S_T \\ \alpha'_3 &= [\alpha_3 \cdot (S_T - S_R) + \alpha_R \cdot S_R] / S_T \end{aligned}$$

Applicando il sistema di cui sopra è stato quantificato che l'area di superficie ad emissività selettiva, con valore medio

dell'emissività nello spettro solare pari a 0.01 da disporre sulla superficie terrestre (vedi metodologie proposte nell'altro brevetto e descritte nel seguito) necessaria a compensare l'effetto dell'immissione in atmosfera di una tonnellata di CO<sub>2</sub> è pari a 24 m<sup>2</sup>. Valore che dipende però dalla latitudine a cui si realizza l'intervento e che quindi, sfruttando zone equatoriali a più alto valore di irraggiamento solare, può essere ulteriormente ridotto.

Nell'altro brevetto (n. PG 2007 A 0009) vengono altresì individuate alcune soluzioni sostenibili per realizzare le superfici riflettenti necessarie ad attuare le proposte del brevetto precedentemente descritto:

- rivestimento con materiali riflettenti ad emissività selettiva dei tetti delle abitazioni, delle coperture degli impianti sportivi ed industriali e più in generale di tutte le superfici disponibili;
- disposizione sul manto stradale di strati di vernice o di qualsiasi altro tipo di materiale con coefficiente di riflessione della luce solare maggiori di quello della superficie terrestre ed eventualmente con un coefficiente di emissività molto più elevato rispetto a quello della superficie terrestre nell'infrarosso;
- coltivazione e l'impianto floreale di fiori, arbusti e alberi con idonee caratteristiche cromatiche. Tali specie dovranno presentare valori del coefficiente di riflessione nello spettro solare maggiori di quello della superficie terrestre;
- l'installazione sulle superfici marine ed oceaniche di isole artificiali piane. Le isole dovranno essere caratterizzate da superfici con valori del coefficiente di riflessione molto più elevato rispetto a quello della superficie marina;
- l'installazione sulle superfici marine ed oceaniche di isole artificiali piane in cui la superficie riflettente sarà realizzata mediante la deposizione di sale marino ottenuto dalla stessa evaporazione dell'acqua di mare (isole di sale);
- creazione di zone artificiali quali saline e vasche di colmata lungo le coste marine ove è minimo l'impatto ambientale o in aree non di pregio quali siti petrolchimici, porti industriali.

## DESCRIZIONE DEL PROTOTIPO

Come mostrato in figura 2 e figura 3, due cupole concentriche in vetro sono state alloggiare sopra un piano isolante in teflon.

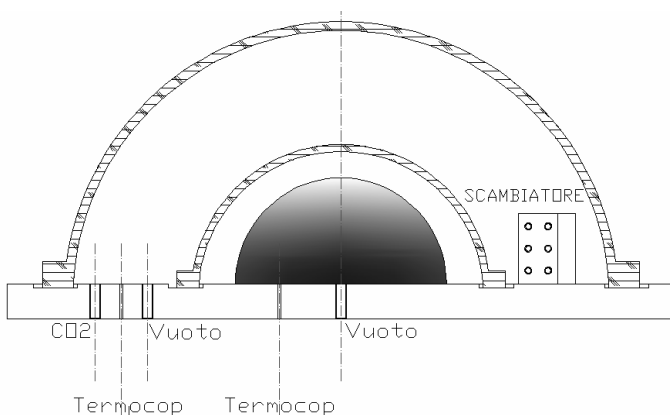


Figura 2: Sezione verticale del prototipo.

Nella cupola interna, è stata posizionata una calotta sferica (CS) in plastica che rappresenta la superficie terrestre isolata termicamente dal piano sopra il quale appoggia. Nella parte interna della calotta a contatto con la superficie sono posizionate delle termocoppie al fine di controllare, tramite una scheda d'acquisizione collegata ad un PC la temperatura della CS. All'interno della cupola più piccola (C2) viene fatto il vuoto per garantire che la CS scambi con l'ambiente solo per irraggiamento.

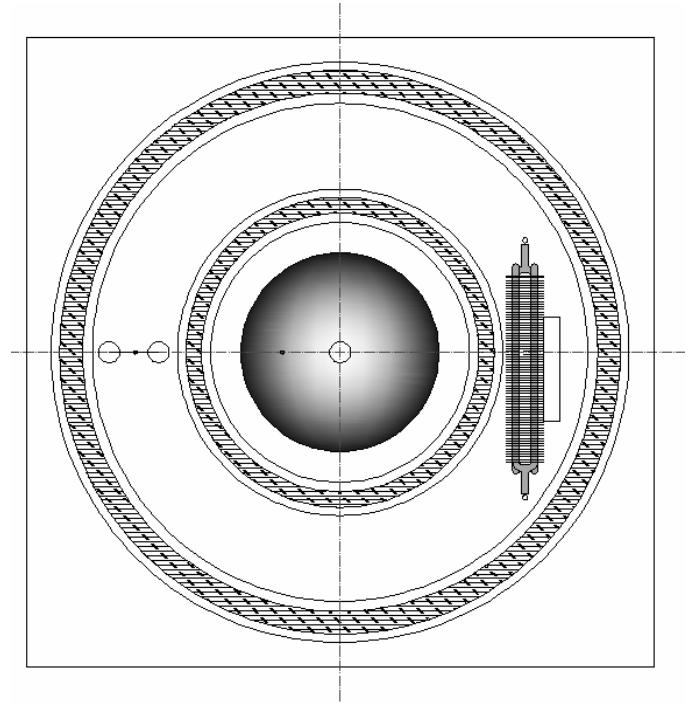


Figura 3: Visione del piano orizzontale del prototipo.

Nell'intercapedine tra le due cupole di vetro viene fatto il vuoto ed inserita anidride carbonica per garantire che all'interno dell'intercapedine non si formi brina o condensa.

Il vuoto all'interno di C2 e dell'intercapedine è realizzato mediante una pompa. Il circuito d'aspirazione della pompa è dotato di una valvola a tre vie che permette di fare il vuoto in tempi diversi in C2 e nell'intercapedine oltre che chiudere il circuito una volta ottenuto il vuoto. Quest'ultimo è garantito da due guarnizioni di gomma che poste nelle sedi ricavate sul basamento garantiscono un accoppiamento a tenuta tra C2 e C1 da un lato e il basamento di teflon dall'altro.

Nell'intercapedine si trova anche uno scambiatore alettato fluido-CO<sub>2</sub> collegato ad un chiller che assicura una temperatura del fluido termovettore fino a -40°C. Per produrre uno scambio maggiore tra il fluido e la CO<sub>2</sub> e per uniformare la temperatura del gas contenuto all'interno di tutta l'intercapedine allo scambiatore è accoppiata una ventola elettrica. L'intercapedine è mantenuta ad una temperatura pari a -35°C.

Una lampada allo xeno ad alta pressione fissata ad una distanza di circa 54 centimetri dalla calotta sferica irradia il sistema scaldando la CS interna.

## Caratteristiche degli elementi del prototipo

Si riportano di seguito sotto forma di tabella le principali caratteristiche degli elementi che costituiscono il prototipo.

**a) Base di teflon:**

Tabella 1: Caratteristiche della base di teflon.

	<b>Base di teflon</b>
Dimensioni (11x12xH) cm	75x75x5
Profondità sede guarnizione cm	0,5
Conducibilità termica W/(m K)	0.23

**b) Cupole di vetro:**

Tabella 2: Caratteristiche delle due cupole di vetro.

	<b>Cupola 1 (C1)</b>	<b>Cupola 2 (C2)</b>
Diametro cm	60	40
Altezza cm	30	23
Spessore cm	0.8	0.4

Di cui sotto si riportano le curve di trasmissione al variare della lunghezza d'onda della radiazione incidente e dello spessore del vetro che costituisce la cupola stessa.

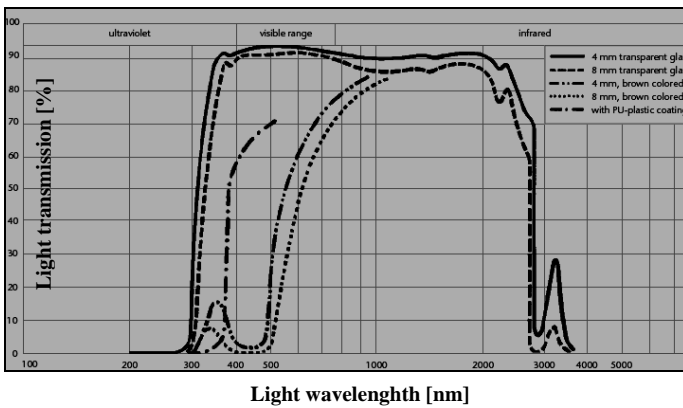


Figura 4: Curve di trasmissione al variare della lunghezza d'onda per cupole di spessore 8 mm e 4 mm.

**c) Calotta sferica:**

Tabella 3: Caratteristiche della calotta sferica.

	<b>Calotta sferica (CS)</b>
Diametro cm	28
Conducibilità termica W/(m K)	0,23

**d) Scambiatore alettato:**

Tabella 4: Caratteristiche dello scambiatore alettato.

	<b>Base di teflon</b>
Dimensioni alette (11x12) cm	4x8
Lunghezza cm	16
Diametro tubi refrigerante cm	0,8
Potenza frigorifera massima kW	1,5

**e) Pompa da vuoto:**

Tabella 5: Caratteristiche della pompa per il vuoto.

	<b>Pompa da vuoto</b>
Potenza W	550
Velocità d'aspirazione m <sup>3</sup> /h	16
Vuoto massimo realizzabile Pa	5

**f) Chiller:**

Tabella 6: Caratteristiche del chiller.

	<b>Chiller</b>
Potenza kW	4.1
Temperatura °C (minima del fluido termovettore)	-40

**g) Lampada allo xeno:**

Tabella 7: Caratteristiche della lampada allo xeno.

	<b>Lampada xeno</b>
Potenza assorbita dalla lampada W	1600
Potenza irradiata W/m <sup>2</sup> (ad una distanza di 54 cm)	485

Di cui sotto si riporta il tipico spettro di emissione.

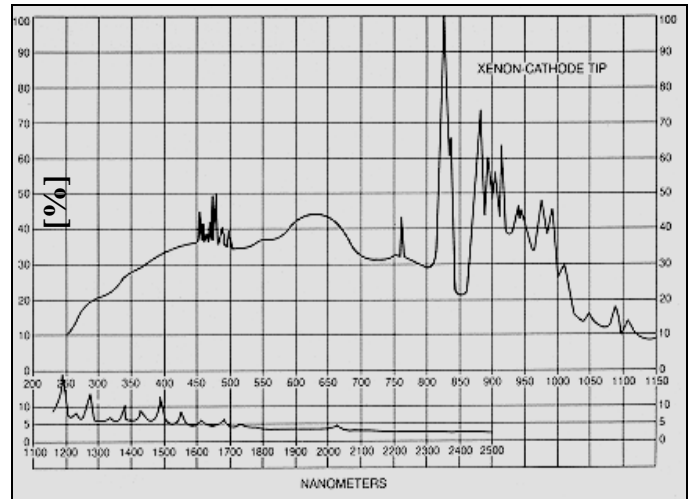


Figura 5: Spettro d'emissione di una lampada allo xeno ad alta pressione.

**PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL PROTOTIPO**

La radiazione emessa dalla lampada allo xeno, dopo aver attraversato la C1 e la C2 colpisce la superficie della calotta sferica. Le due campane si comportano come dei corpi trasparenti caratterizzati da specifici coefficienti di riflessione (r), assorbimento (a) e trasparenza (t) che in parte assorbono, riflettono e lasciano trasparire la radiazione incidente.

La calotta sferica si comporta invece come un corpo grigio con fissati valori di coefficiente di riflessione e di assorbimento. Quest'ultima si porta ad una temperatura di

equilibrio frutto della radiazione visibile incidente e della radiazione infrarossa uscente dovuta alla presenza della calotta a  $-35\text{ C}^\circ$ . Variando l'albedo della CS, ossia variando il suo coefficiente di riflessione nel visibile, si può valutare come varia la temperatura a cui in condizioni stazionarie si porta il sistema Terra-Atmosfera rappresentato appunto da CS. La variazione dell'albedo si può facilmente realizzare applicando su CS delle superfici ad emissività selettiva costituite da materiale apposito.

## STUDIO DELLE EQUAZIONI CHE REGOLANO IL FENOMENO

I tre corpi hanno caratteristiche di emissività selettive ovvero che mostrano diversi valori delle proprietà fotometriche negli intervalli dello spettro solare e dell'infrarosso; in ciascuno di questi due intervalli talune proprietà si considerano costanti seppur diverse tra di loro. Introducendo pertanto le proprietà emissive medie dei corpi nello spettro solare e nell'infrarosso si determina il bilancio energetico in ciascuno degli intervalli di lunghezza d'onda suddetti: per ciascun corpo si introduce il coefficiente di assorbimento medio, il coefficiente di riflessione medio, il coefficiente di trasmissione medio e la radiosità nello spettro solare e nell'infrarosso.

In condizioni di regime stazionario, valgono le seguenti ipotesi operative:

1. temperatura dei corpi costante;
2. proprietà radiative dei corpi uniforme (radiosità uniforme);
3. emissione dei corpi perfettamente diffusa;
4. lunghezza d'onda del visibile che comprende anche il vicino infrarosso  $0.38\ \mu\text{m} \leq \lambda \leq 2\ \mu\text{m}$ ;
5. lunghezza d'onda dell'infrarosso spinto  $\lambda > 3\ \mu\text{m}$ ;
6. coefficienti di riflessione, assorbimento, trasparenza medi e costanti rispettivamente nel campo del visibile e dell'infrarosso;
7. trasmissione di calore per conduzione nullo nell'intercapedine e con l'ambiente esterno;
8. l'energia irradiata dalla cupola C2 colpisce totalmente la cupola C1;
9. l'energia irradiata dalla calotta sferica CS colpisce totalmente la cupola C2;
10. la temperatura della superficie interna della cupola C2 è costante alla temperatura di  $-30\text{C}^\circ$  grazie ad un termostato che agisce sulla temperatura del gas contenuto fra la cupola C2 e C1.

Lo schema del fenomeno a cui si fa riferimento nei calcoli è quello rappresentato in figura 6.

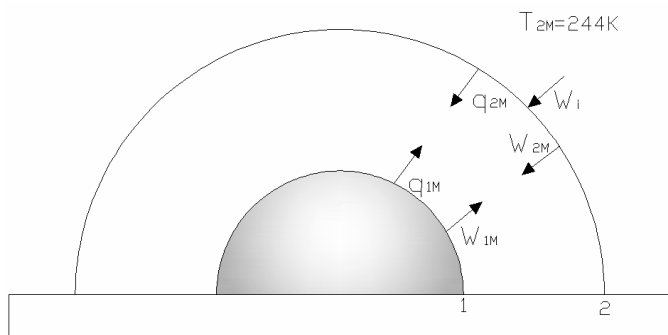


Figura 6: Schema dei flussi energetici scambiati dagli elementi del prototipo nel visibile e nell'infrarosso.

## Visibile

$$A_1 \cdot W_{1M} = r_{1M} \cdot (F_{21} \cdot A_2 \cdot W_{2M})$$

$$A_2 \cdot W_{2M} = A_1 \cdot W_i \cdot t_{2M} + r_{2M} \cdot (A_1 \cdot W_{1M} + A_2 \cdot F_{22} \cdot W_{2M})$$

In virtù della geometria dei corpi che prendono parte al fenomeno si ha:

$$F_{12} = 1; F_{21} = \frac{A_1}{A_2}; F_{22} = 1 - \frac{A_1}{A_2}$$

## Infrarosso

$$A_1 \cdot q_{1M} = \sigma_o \cdot A_1 \cdot \alpha_{1M} \cdot T_{1M}^4 + \rho_{1M} \cdot A_2 \cdot F_{21} \cdot q_{2M}$$

$$A_2 \cdot q_{2M} = \sigma_o \cdot A_2 \cdot \alpha_{2M} \cdot T_{2M}^4 + \rho_{2M} \cdot (A_1 \cdot F_{12} \cdot q_{1M} + A_2 \cdot F_{22} \cdot q_{2M})$$

Infine introducendo un bilancio complessivo di energia in corrispondenza del corpo 1 si ha:

$$A_1 \cdot (q_{1M} + W_{1M}) = A_2 \cdot F_{21} \cdot (q_{2M} + W_{2M})$$

Dalla soluzione del sistema formato da 5 equazioni in 5 incognite si ottiene il valore della temperatura sulla superficie del corpo 1.

## CONCLUSIONI

Sulla base delle caratteristiche dei materiali che compongono gli elementi del sistema per una radiazione incidente sulla calotta esterna pari a  $300\text{ W/m}^2$ , i valori della temperatura di equilibrio della CS ottenuti al variare del proprio coefficiente di assorbimento nel visibile, sono riportati in tabella 8.

Tabella 8: Temperatura della CS al variare del proprio coefficiente di assorbimento medio nel visibile.

$a_M$	T [°K]	$\Delta a_M$	$\Delta T$	$\Delta T/\Delta a_M$
0,92	281,89	-	-	-
0,9	281,25	0,02	0,64	32
0,88	280,61	0,02	0,64	32
0,86	279,95	0,02	0,66	33
0,84	279,29	0,02	0,66	33
0,82	278,63	0,02	0,66	33

Si osserva che il parametro  $\Delta T/\Delta a$  risulta con buona approssimazione costante nell'intervallo dei valori tipici del coefficiente di assorbimento nel visibile della CS; tale circostanza consente di affermare che la temperatura dipende in maniera lineare dallo stesso coefficiente di assorbimento. I risultati ottenuti verranno verificati mediante una campagna di misura sperimentale in corso di svolgimento.

Confrontiamo ora i valori di  $\Delta T/\Delta a$  riportati in tabella 8 con quelli ottenibili dalla risoluzione del modello proposto nei brevetti oggetto di studio e riportati in tabella 9.

Tabella 9: Temperatura della Terra al variare del suo coefficiente di assorbimento medio nel visibile.

$a_T$	$T$ [°K]	$\Delta a_T$	$\Delta T$	$\Delta T/\Delta a_T$
0,92	288,22	-	-	-
0,90	287,46	0,02	0,76	38
0,88	286,69	0,02	0,77	38,5
0,86	285,90	0,02	0,79	39,5
0,84	285,09	0,02	0,81	40,5
0,82	284,26	0,02	0,83	41,5

Si può vedere come i due modelli abbiano valori simili di sensibilità della temperatura alla variazione del coefficiente di assorbimento medio nel visibile.

## ELENCO DEI SIMBOLI

$w_1$  = radiosità della volta celeste nello spettro solare [ $W/m^2$ ];  
 $w_2$  = radiosità dell'atmosfera nello spettro solare emessa verso la superficie terrestre [ $W/m^2$ ];  
 $w'_2$  = radiosità dell'atmosfera nello spettro solare emessa verso la volta celeste [ $W/m^2$ ];  
 $w_3$  = radiosità della superficie terrestre nello spettro solare [ $W/m^2$ ];  
 $a_3$  = coefficiente di assorbimento medio della Terra nello spettro solare;  
 $a_R$  = coefficiente di assorbimento medio della superficie riflettente nello spettro solare;  
 $a_3'$  = coefficiente di assorbimento medio terrestre nello spettro solare in funzione dell'area della superficie terrestre di quella ad emissività selettiva installata;  
 $r_2$  = coefficiente di riflessione medio dell'atmosfera nello spettro solare;  
 $r_3$  = coefficiente di riflessione medio della terra nello spettro solare;  
 $t_2$  = coefficiente di trasparenza medio dell'atmosfera nello spettro solare;  
 $q_2$  = radiosità dell'atmosfera nell'infrarosso emessa verso la superficie terrestre [ $W/m^2$ ];  
 $q'_2$  = radiosità dell'atmosfera nell'infrarosso emessa verso la volta celeste [ $W/m^2$ ];  
 $q_3$  = radiosità della superficie terrestre nell'infrarosso [ $W/m^2$ ];  
 $\rho_2$  = coefficiente di riflessione medio dell'atmosfera nell'infrarosso;  
 $\rho_3$  = coefficiente di riflessione medio della terra nell'infrarosso;  
 $\tau_2$  = coefficiente di trasparenza medio dell'atmosfera nell'infrarosso;  
 $\alpha_2$  = coefficiente di assorbimento medio dell'atmosfera nell'infrarosso;  
 $\alpha_3$  = coefficiente di assorbimento medio della Terra nell'infrarosso;  
 $\alpha_3'$  = coefficiente di assorbimento medio terrestre nell'infrarosso in funzione dell'area della superficie terrestre e di quella ad emissività selettiva installata;  
 $\alpha_R$  = coefficiente di assorbimento medio della superficie riflettente nell'infrarosso;  
 $T_1$  = temperatura della superficie terrestre [K];  
 $T_2$  = temperatura media dell'atmosfera [K];  
 $S_T$  = area della superficie terrestre [ $m^2$ ];  
 $S_R$  = area della superficie ad emissività selettiva [ $m^2$ ];

$w_{1M}$  = radiosità della calotta CS nello spettro solare emessa verso la cupola C2 [ $W/m^2$ ];  
 $w_{2M}$  = radiosità cupola C2 nello spettro solare emessa verso la calotta CS [ $W/m^2$ ];  
 $w_i$  = potenza luminosa emessa dalla lampada allo xeno che colpisce la cupola C2 [ $W/m^2$ ];  
 $q_{1M}$  = radiosità della calotta CS nell'infrarosso emessa verso la cupola C2 [ $W/m^2$ ];  
 $q_{2M}$  = radiosità della cupola C2 nell'infrarosso emessa verso la calotta CS [ $W/m^2$ ];  
 $r_{1M}$  = coefficiente di riflessione medio della calotta CS nello spettro solare;  
 $r_{2M}$  = coefficiente di riflessione medio della cupola C2 nello spettro solare;  
 $t_{2M}$  = coefficiente di trasparenza medio della cupola C2 nello spettro solare;  
 $F_{12}, F_{22}, F_{21}$  = fattori di forma;  
 $A_1$  = area della superficie della calotta CS [ $m^2$ ];  
 $A_2$  = area della superficie della cupola C2 [ $m^2$ ];  
 $\alpha_{1M}$  = coefficiente di assorbimento medio della calotta CS nell'infrarosso;  
 $\alpha_{2M}$  = coefficiente di assorbimento medio della cupola C2 nell'infrarosso;  
 $\rho_{1M}$  = coefficiente di riflessione medio della calotta CS nell'infrarosso;  
 $\rho_{2M}$  = coefficiente di riflessione medio della cupola C2 nell'infrarosso;  
 $T_{1M}$  = temperatura della superficie della calotta CS [K];  
 $T_{2M}$  = temperatura della superficie della cupola C2 [K];  
 $\sigma_0$  = costante di Stefan Boltzmann  $5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ .

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp;
2. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Richard Alley, Terje Berntsen, Nathaniel L. Bindoff, Zhenlin Chen, et al.] Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, Paris, February 2007;
3. Franco Cotana, Federico Rossi, Superfici riflettenti equivalenti a quantità di gas serra ai fini dei certificati di emissione e del commercio dei diritti di emissione, basate sul controllo dell'albedo terrestre e finalizzate al contenimento del riscaldamento globale in base alla relazione quantitativa tra la temperatura media della terra, la concentrazione di gas serra in atmosfera e le caratteristiche radiative della superficie terrestre stessa, Brevetto n. PG 2006 A 0086, Depositato presso l'Ufficio Provinciale Industria Commercio ed Artigianato di Perugia;
4. Franco Cotana, Federico Rossi, "Sistemi e dispositivi per il controllo dell'albedo terrestre finalizzati al contenimento del riscaldamento globale in base alla relazione quantitativa di cui al brevetto n. PG 2006 A 0086", Brevetto n. PG 2007 A 0009, Depositato presso l'Ufficio Provinciale Industria Commercio ed Artigianato di Perugia;
5. Mauro Felli, Lezioni di Fisica Tecnica 2, Trasmissione del calore, Acustica, Tecnica dell'illuminazione, Nuova edizione a Cura di Federico Rossi, Morlacchi ed., Cap.4.

## VALUTAZIONE DEL CLIMA DI ALCUNE CITTÀ ITALIANE MEDIANTE UN INDICE DI QUALITÀ AMBIENTALE

A. Magrini, M. Albertini

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

### SOMMARIO

Vengono presentati ulteriori sviluppi di una ricerca svolta nell'ambito di un progetto sulla qualità urbana, in riguardante la valutazione dell'incidenza complessiva di fattori di tipo urbanistico-architettonico ed ambientale sulla percezione dello stato di salute da parte della popolazione.

La schematizzazione adottata prevede la definizione di indicatori ed indici che possano quantificare l'importanza e l'incidenza dei diversi fattori dipendenti da parametri ambientali, urbanistici e architettonici. Tra gli aspetti considerati per definire un indice di qualità ambientale, è stata analizzata la valutazione dell'indice legato al benessere termoisometrico in ambiente esterno (altri elementi che concorrono a definire l'indice globale di qualità ambientale sono legati all'inquinamento acustico, atmosferico, etc.).

Da un'indagine svolta su descrittori ambientali (humidex, temperatura equivalente, etc.) è emerso che le grandezze significative che generalmente vengono messe in relazione con la sensazione di benessere in esterno sono sostanzialmente quattro: temperatura, umidità, velocità dell'aria, radiazione solare. L'indice di qualità ambientale si basa sulla ponderazione di indicatori relativi alle quattro grandezze considerate: l'analisi si è concentrata sull'individuazione di fattori di ponderazione idonei a fornire un risultato congruente con quello ottenuto mediante i descrittori ambientali. A tal fine la metodologia è stata applicata a climi cittadini diversi tra loro, per i quali si è confrontato il giudizio fornito mediante descrittori e mediante l'indice di qualità ambientale.

Oltre a ciò è stata valutata la variabilità dell'indice e dei singoli indicatori in varie zone di una stessa città, in modo da verificarne la possibilità di utilizzo per un giudizio locale sulle condizioni di benessere in ambiente esterno.

### INTRODUZIONE

Lo studio del benessere in ambiente esterno rappresenta una materia complessa che richiede approfondimenti in campi molto diversi quali l'urbanistica, l'architettura, la medicina e l'ingegneria. Per una completa definizione del problema non si può infatti prescindere da uno studio globale e integrato di diversi aspetti che caratterizzano l'ambiente urbano come il traffico, il clima, il grado di urbanizzazione, ecc.

Il lavoro svolto si colloca all'interno di questo contesto, concentrando l'attenzione sullo studio del benessere dal punto di vista termoisometrico, analizzando gli strumenti di valutazione presenti in letteratura e formulando un "indice di qualità ambientale" che possa fornire risultati confrontabili con quelli già ottenibili mediante altri indicatori, ma che tenga conto di un numero di variabili sufficientemente ampio.

L'obiettivo che ci si pone è quello di trasporre in termini "quantitativi" e "misurabili" un concetto come il benessere, al fine di rendere più oggettiva possibile la sua valutazione.

Dalla letteratura si possono trarre informazioni da più di 100 descrittori/indicatori/indici per la valutazione del comfort termico, ciascuno con formulazioni, scale di giudizio e campi di applicazione differenti [1].

In alcuni casi sono disponibili espressioni che tengono conto di un numero sufficientemente rappresentativo di variabili, ma il risultato così ottenuto non riesce a confrontarsi direttamente con altri elementi di tipo quantitativo / qualitativo relativi ad altri settori di indagine (acustica, architettonica, urbanistica) per difficoltà relative alle differenti scale di valutazione.

In questo ambito, una ricerca europea (Progetto RUROS, [2]) fornisce utili indicazioni per una migliore omogeneizzazione dei diversi elementi che contribuiscono alla

definizione di qualità dell'ambiente esterno.

Tenendo conto anche dei risultati di queste indagini si è voluto procedere a formulare una metodologia che permetta di descrivere le condizioni dell'ambiente esterno con un solo indice di qualità globale. Questo dovrebbe tener conto dei molteplici fattori che concorrono alla definizione di benessere e potrebbe fornire un utile e sufficientemente semplice strumento di pianificazione urbanistica per il miglioramento della qualità ambientale e per la maggiore fruibilità degli spazi aperti.

L'ambiente urbano risulta particolarmente suscettibile non solo alle condizioni climatiche, ma anche ad altri aspetti di tipo qualitativo (urbanistico-architettonici) e quantitativo (inquinamento acustico, effetto della radiazione solare diretta e riflessa, effetto dei canyon urbani). Lo studio si inserisce in questo contesto [3,4], ed è finalizzato ad approfondire gli aspetti relativi ad un aspetto che, combinato con altri, possa realizzare una base di valutazione sufficientemente ampia.

Ovviamente maggiore è grado di densità di popolazione, più elevato risulta il numero di soggetti coinvolti: questo fatto può rendere ancora più interessante l'applicazione di questa metodologia sia per una verifica sull'esistente, e quindi per la valutazione di possibilità di intervento, sia per una progettazione urbanistica più mirata alle esigenze di benessere dell'individuo in senso più ampio di quanto avvenuto fino ad ora.

### BENESSERE TERMOISOMETRICO IN AMBIENTE ESTERNO

Per valutare e quantificare il benessere termoisometrico in relazione alle condizioni climatiche è possibile ricorrere a

indici ed indicatori, che in questo contesto vengono indicati come “descrittori”, che vengono calcolati attraverso formule empiriche in dipendenza di uno o più parametri ambientali e che solitamente sono caratterizzati da un’unità di misura.

Il numero ed il tipo dei parametri da cui dipendono varia da un descrittore all’altro, ma è possibile individuarne quattro che possono essere definiti come i più significativi:

- temperatura
- umidità
- velocità del vento
- radiazione solare

Nelle formulazioni algebriche dei diversi descrittori compaiono quindi uno o più di questi parametri che variano significativamente sia nel tempo che nello spazio.

Ciò che rende diverso un descrittore dall’altro è il modo in cui i parametri considerati vengono combinati tra loro e il peso che viene dato ad uno piuttosto che all’altro.

Le maggiori difficoltà di applicazione di queste espressioni per la valutazione della sensazione di benessere in ambiente esterno si possono attribuire all’influenza della stagione, dell’abbigliamento, della copertura nuvolosa del cielo, dalle aspettative dell’individuo in relazione al clima, etc.

Per questi motivi le espressioni di questi descrittori li rendono validi soltanto per il particolare contesto per le quali sono state formulate. Di conseguenza non tutti i descrittori possono essere utilizzati in ogni caso specifico, ma il loro utilizzo è subordinato alle caratteristiche climatiche del luogo di studio.

Nel presente studio sono stati scelti solo alcuni dei descrittori presenti in letteratura, per i quali le condizioni climatiche considerate possano rientrare nei campi di applicazione. Per le espressioni analitiche e per maggiori dettagli si rimanda ad un precedente lavoro relativo a valutazioni preliminari sull’argomento [1]. In sintesi i descrittori considerati sono i seguenti:

- WC (Wind Chill) (Siple & Passel, 1945)
- WCI (Wind-Chill Index) (Steadman, 1945)
- IS (Scharlau Index) (1950)
- DI(T) (Thom Index) (1959)
- THI (Thermo-Hygommetrical Index) (1979, 1994)
- AT (Apparent Temperature) (1979)
- H (Humidex) (1979)
- HS (Indicatore stress termico) (1959 → 82)
- CP (Climate Perception) (M.Tacken, 1989)
- RSI (Relative Strain Index) (1992)
- $t_{eq}$  (Indicatore di Temperatura Equivalente) (1984)
- SSI (New Summer Simmer Index) (1987 → 2000)
- $T_{eq}$  (Equivalent temperature) (2004)

A questi si è aggiunto in tempi recenti l’indice ASV (Actual Sensation Vote) che rappresenta un indice di valutazione termica della popolazione in ambiente esterno in riferimento ad una scala di 5 punti (molto freddo-molto caldo).

La definizione di questo indice è stata elaborata nel 2004 all’interno di un progetto che ha coinvolto 14 diverse città europee chiamato Progetto RUROS [2].

Le espressioni algebriche che legano tra loro questi parametri comprendono coefficienti che variano da città a città. Ne risulta che ciascuna località presa in considerazione nel progetto ha una sua espressione caratteristica dell’indice che si adatta alle condizioni climatiche locali.

La relazione che viene proposta in territorio italiano si riferisce alla città di Milano:

$$ASV_{MI} = 0.049 t_a - 0.0002 G + 0.006 w + 0.002 UR - 0.920$$

( $r = 0.44$ )

Nello stesso progetto viene proposta anche un’espressione “generale” valida per l’intero territorio europeo:

$$ASV_{EU} = 0.049 t_a + 0.001 G - 0.051 w + 0.014 UR - 2.079$$

( $r = 0.78$ )

Sempre in tempi recenti, nel 2000, la *International Society of Biometeorology* ha istituito una commissione di esperti internazionali (*ISB Commission 6*) per lo sviluppo di un “*Universal Thermal Climate Index*” (*UTCI*).

A questa commissione nel 2004 si è affiancato un nuovo gruppo di esperti istituito dalla *European Cooperation in Scientific and Technical Research (COST)* che ha attivato il programma *COST Action 730*, prevedendo sul tema lo sviluppo di una ricerca della durata di quattro anni a partire dal 2005. I report disponibili sullo sviluppo della ricerca non riportano informazioni sull’espressione dell’indice UTCI.

Si suppone che essa possa basarsi su quanto già sperimentato in [5] in termini di temperatura equivalente (ultimo nell’elenco precedente), anch’essa funzione dei quattro parametri significativi per il benessere in ambiente esterno, ovvero temperatura, umidità relativa, velocità del vento, radiazione solare. Esso viene indicato anche come “overall comfort index” e tiene conto anche della sensazione soggettiva, valutata mediante un’ampia indagine in merito al grado di soddisfazione per il clima esterno della popolazione.

In letteratura compaiono studi nei quali viene analizzata la possibilità di applicare la teoria di Fanger alle condizioni ambientali esterne. Tuttavia l’indice PMV (Predicted Mean Vote), realizzato per predire le condizioni di comfort termico di un individuo in ambiente interno, è stato validato per condizioni stazionarie interne, che si discostano poco dalle condizioni di comfort.

Nonostante il loro utilizzo sia idoneo solo per ambienti interni, non è raro riscontrare in letteratura l’utilizzo di questi due indici per ambienti esterni [6].

Tuttavia esso non viene preso in considerazione nelle attuali analisi, in quanto risulta inappropriato per alcuni motivi, tra i quali:

- L’ambiente esterno presenta delle condizioni termoigrometriche estremamente variabili nel tempo, quindi ben lontane dalle condizioni stazionarie per le quali è stato studiato l’indice.
- Le condizioni termiche dell’ambiente esterno sono spesso molto lontane dalle condizioni di comfort.
- L’acclimatamento di un individuo ad un ambiente esterno risulta molto più complesso di quello ad un ambiente interno e spesso il passaggio da un ambiente interno termoregolato ad un ambiente esterno con condizioni molto diverse può indurre l’individuo ad alzare il suo standard di comfort. Contribuiscono infatti alla definizione di comfort componenti psicologiche non trascurabili. Solitamente un individuo sottoposto alle stesse condizioni termoigrometriche in ambiente esterno ed interno tende a dare un giudizio migliore nel primo caso, poiché psicologicamente più predisposto a subire determinate condizioni.
- La temperatura dell’aria in ambiente esterno risulta spesso al di fuori dell’intervallo di significatività del PMV fissato dalla ISO 7730 tra i 10°C ed i 30°C.
- L’indice risulta applicabile solo per velocità dell’aria inferiori a 1 m/s (ISO 7730). Uno studio sulla validazione del PMV [7] ha evidenziato come l’indice sottostimi l’effetto raffreddante dell’aria in movimento per velocità superiori a 0.2 m/s.

## L'IMPORTANZA DI UN INDICE GLOBALE

L'elenco di descrittori qui considerato non vuole essere assolutamente esaustivo. Ciascuno di questi, essendo formulato partendo da studi specifici, si può applicare solo in determinate condizioni termoigrometriche. Anche limitandosi solamente all'analisi della sensibilità degli indici rispetto alla temperatura, si osserva una situazione estremamente eterogenea.

A causa di queste caratteristiche, risulta molto difficile l'utilizzo di un solo indice per lo studio del comfort termico di una determinata città, poiché esistono descrittori "adatti" a condizioni invernali ed altri a condizioni estive (figura 1). Questo problema è riscontrabile soprattutto nel caso di climi temperati dove le differenze di temperatura tra stagioni estive e stagioni invernali sono significative. Su scala annuale, invece, il problema più evidente è rappresentato dalla mancanza di un indice affidabile per le stagioni intermedie (primavera e autunno) le cui temperature medie non permettono l'utilizzo né di descrittori invernali né estivi.

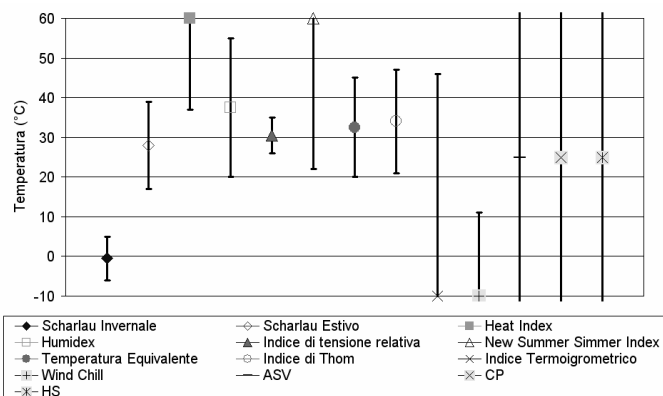


Figura 1 – Campo di applicazione dei descrittori analizzati

Un altro aspetto importante da sottolineare è che ciascun descrittore fornisce valori in unità di misura ben precise come riportato in Tabella 1.

Tabella 1 – Unità di misura

Sharlau Index	°C
Heat Index	°C
Humidex	°C
Indice di tensione relativa	°C/hPa
New Summer Simmer Index	°F
Temperatura Equivalente	°C
Indice di Thom	°C
Indice Termoigrometrico	°C
Wind Chill (Steadman)	W/m <sup>2</sup>
New Wind Chill	°C

Le unità di misura e le scale di giudizio dei vari descrittori li rendono difficilmente confrontabili tra loro. Questo fatto è rilevante, poiché, non esistendo per l'ambiente esterno una normativa che individui un indice o una procedura per la valutazione del comfort termico, ciascun ente di controllo può scegliere di utilizzare un descrittore piuttosto che un altro. Per questo motivo risulta difficile il confronto tra diverse città dal punto di vista del comfort termico.

## INDICATORI ED INDICI

La metodologia trae spunto, come già accennato, da esigenze di correlazione tra aspetti di qualità ambientale, paesistica, ed architettonica finalizzate alla formulazione di un giudizio qualitativo e quantitativo dell'ambiente urbano, per la determinazione quanto più oggettiva possibile e completa della qualità di un ambito urbano, in relazione al benessere dei residenti.

Su questa base si è manifestata la necessità elaborare un criterio che trasponesse in termini "quantitativi" e "misurabili" gli aspetti che concorrono alla determinazione della qualità e del benessere in ambiente esterno, al fine di rendere più oggettivo possibile il giudizio di valutazione.

A partire da considerazioni di carattere generale sull'ambiente e sulla qualità della città, attraverso la determinazione di parametri significativi del paesaggio urbano che influiscono sulla percezione della qualità urbana da parte della popolazione, si giunge alla definizione di indicatori di tipo urbanistico-architettonico, ai quali viene assegnato un punteggio di qualità parziale definito convenzionalmente [8].

In questo ambito si inserisce lo studio riguardante indici ed indicatori di qualità ambientale. Esso ha come finalità la possibilità di valutare mediante indicatori, opportunamente pesati, parametri qualitativi e quantitativi tra loro molto differenti. Attraverso l'aggregazione di questi in indici, si può ottenere un giudizio di qualità globale che tenga conto di una grande varietà di elementi molto diversi tra loro che però sono utili alla sua definizione.

Il ricorso a indicatori ed indici per la quantificazione di aspetti legati all'ambiente è riconosciuto a livello internazionale: le prestazioni ambientali per esempio (Raccomandazione della Commissione, 10 luglio 2003, [9]) possono essere valutate in modo semplificato mediante procedure di analisi basate sulla definizione di particolari indicatori. Questi, pur essendo ricavati in funzione di una grande quantità di valori misurati, permettono di ottenere informazioni di facile comprensione e interpretazione.

In questo studio la scala di variazione dell'indicatore come anche dell'indice è considerata in modo omogeneo sulla base di un giudizio su 5 livelli (ottimo, buono, sufficiente, insufficiente, gravemente insufficiente) ai quali corrisponde un determinato intervallo di variazione della grandezza relativa.

Come già indicato in [1], al numero  $n$  di valori misurati della grandezza, sul totale  $N$  di quelli misurati, che ricade in ciascun intervallo, viene attribuito un peso relativo ( $k$ ). I pesi possono essere scelti in modo che il valore massimo (100) corrisponda al giudizio più positivo ed i valori più bassi (fino a 0) a situazioni sempre meno confortevoli.

Ciascun indicatore è quindi calcolato secondo un'espressione del tipo:

$$I = \sum_i (n_i / N) k_i \quad (1)$$

L'indice di qualità (IQA) è valutato aggregando i diversi indicatori ( $I$ ), ciascuno moltiplicato per un opportuno fattore di ponderazione ( $K$ ):

$$IQA = \sum_i I_i K_i \quad (2)$$

I fattori di ponderazione, come i pesi relativi, hanno un campo di variazione da 0 a 100 e sono stati determinati in modo da ottenere valutazioni coerenti con quelle dei descrittori prima considerati.

## VALUTAZIONE MEDIANTE INDICATORI E INDICI

Sulla base delle valutazioni preliminari già sviluppate [1]

sono stati determinati i pesi relativi (k). I fattori di ponderazione sono stati rideterminati invece in base ai risultati delle indagini sviluppate sui dati climatici di alcune città italiane. Infatti la metodologia è stata applicata a quattro cittadine con caratteristiche peculiari differenti tra loro:

- 1) Lodi, che rappresenta anche l'unico caso in cui sono state condotte indagini più approfondite ed a largo spettro, riguardanti elementi urbanistico-architettonici, inquinamento acustico ed atmosferico, etc.
- 2) Pavia, che costituisce un utile confronto con Lodi, tra due realtà urbane simili tra loro e sufficientemente vicine da essere confrontabili come latitudine e clima;
- 3) Trento che si colloca in una posizione particolare, a ridosso di rilievi montuosi, in contrasto con la posizione delle altre due cittadine.
- 4) Genova, che rappresenta una realtà urbana molto diversificata, sia per la presenza del mare, sia di rilievi montuosi a ridosso della città.

Di ciascuna città si sono raccolte informazioni di carattere geografico e urbanistico.

Sono quindi stati raccolti i dati climatici rilevati dalle stazioni meteo-climatiche collocate in una postazione per ciascuna cittadina, mentre per Genova sono stati considerati i dati monitorati in tre centraline, in diverse zone della città.

Da queste prime fasi dell'indagine emersa immediatamente una difficoltà di base, relativa alla reperibilità di dati climatici registrati con sufficiente continuità, a partire da un numero significativo di anni. Infatti, mentre centraline meteo-climatiche di vecchia generazione hanno registrato più frequentemente i soli dati di temperatura e umidità relativa, per questa indagine diventano indispensabili anche dati di radiazione solare e velocità del vento. I dati accessibili sono stati relativamente omogenei tra loro, in quanto si è potuto basare le valutazioni su dati climatici medi su 10 anni (1996-2005) solo per Genova e Trento, mentre per Pavia e Lodi erano disponibili solo dati relativi all'ultimo quinquennio.

### Calcolo dei descrittori

La valutazione è stata effettuata in base alle misurazioni su base giornaliera ed oraria dei dati di temperatura, umidità relativa, radiazione solare, velocità del vento, riferiti ad un intervallo temporale di 5 o 10 anni, in funzione della disponibilità di dati delle centraline.

Dalle corrispondenti medie mensili, sono stati calcolati i valori dei descrittori per i quali l'ambito di applicazione risultava congruente con i dati climatici: il valore di ciascun descrittore è stato confrontato con la relativa scala di giudizio, in funzione della corrispondente condizione di benessere. La scala di giudizio qualitativo è stata convertita in una scala di giudizio tra 0 e 100 considerata valida per tutti i descrittori.

I descrittori non hanno fornito una valutazione uniforme ed omogenea delle condizioni climatiche analizzate. Questo fatto si può attribuire a diverse cause:

- non sono validi in tutti i campi di valori meteoroclimatici misurati nell'arco dell'anno
- sono valutati solo gli effetti di alcune delle quattro grandezze ambientali assunte come significative per l'indagine (temperatura, umidità, velocità del vento, radiazione solare).

Di conseguenza i giudizi forniti non sono necessariamente sempre concordi tra loro e solitamente sono applicabili nella stagione estiva ed invernale, ma non in quelle intermedie.

### Calcolo degli indicatori e dell'indice

Per ciascuna delle quattro grandezze considerate sono stati assunti gli intervalli in Tabella 2, nei quali calcolarne l'incidenza. Nello stesso modo sono stati assunti gli stessi pesi relativi già testati in precedenza [1], indicati in Tabella 3.

Come già valutato, ad esclusione dell'umidità relativa, i pesi relativi delle altre grandezze sono differenti per i sei mesi più freddi (Ottobre-Marzo, pedice inv) rispetto ai sei mesi più caldi (Aprile-Settembre, pedice est).

Per ciascun parametro è stato calcolato il corrispondente indicatore: per ottenere l'indice di valutazione della qualità ambientale (IQA) i singoli indicatori dovevano essere moltiplicati per il proprio fattore di ponderazione, secondo l'espressione seguente:

$$IQA = (I_t K_t) + (I_{UR} K_{UR}) + (I_{va} K_{va}) + (I_G K_G) \quad (3)$$

Per poter applicare in modo più generale possibile tale relazione, i fattori di ponderazione sono stati rideterminati confrontando i risultati con i valori dei descrittori considerati, in modo da fornire un giudizio congruente.

Tabella 2 – Intervalli per la determinazione dell'indicatore

Classe	t <sub>a</sub> [°C]	UR [%]	G [W/m <sup>2</sup> ]	v <sub>a</sub> [m/s]
I	-10 ÷ 0	0 ÷ 25	1 ÷ 70	0 ÷ 0,5
II	0 ÷ 10	25 ÷ 45	70 ÷ 140	0,5 ÷ 1,5
III	10 ÷ 18	45 ÷ 65	140 ÷ 210	1,5 ÷ 2,5
IV	18 ÷ 26	65 ÷ 85	210 ÷ 280	2,5 ÷ 3,5
V	26 ÷ 45	85 ÷ 100	280 ÷ 350	3,5 ÷ 5,0

Tabella 3 – Pesi relativi (k)

Classe	k <sub>t inv</sub>	k <sub>t est</sub>	k <sub>UR</sub>	k <sub>G inv</sub>	k <sub>G est</sub>	k <sub>va inv</sub>	k <sub>va est</sub>
I	10	0	20	0	0	100	50
II	20	20	70	40	70	90	90
III	100	60	100	100	100	70	100
IV	70	100	40	70	40	50	70
V	0	10	0	20	20	20	20

### Confronto descrittori – indice di valutazione

Per poter confrontare i valori dell'indice e dei descrittori si è ricorsi ad una "scalatura" quantitativa dei giudizi forniti dai descrittori sulla stessa scala (da 0 a 100) utilizzata per la valutazione dell'indice.

In ogni caso è prevedibile che il confronto tra indice di qualità ambientale e i descrittori analizzati non possa portare ad una corrispondenza stretta, in quanto la maggior parte di questi tiene conto solo di alcuni dei quattro parametri considerati per la costruzione dell'indice.

Si è voluto tuttavia operare un confronto, in modo da poter fornire un giudizio congruente con i risultati dei più utilizzati metodi di valutazione della qualità dell'ambiente esterno.

In Tabella 4 si riporta la corrispondenza tra giudizi qualitativi e scala di riferimento.

Tabella 4 – Scala di giudizio

Indicatore	Giudizio
85 ÷ 100	Ottimo
70 ÷ 85	Buono
60 ÷ 70	Accettabile
45 ÷ 60	Non accettabile
< 45	Insopportabile

Dall'analisi sviluppata, i fattori di ponderazione risultati più idonei alla rappresentazione delle condizioni climatiche nelle città analizzate sono stati divisi in due gruppi: uno adatto per le condizioni climatiche di tipo invernale e l'altro per quelle estive. Si è proceduto quindi in modo analogo alla suddivisione dei pesi relativi. I risultati sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5 – Fattori di ponderazione

	Inverno	Estate
Temperatura	$K_t = 45$	$K_t = 40$
Umidità relativa	$K_{UR} = 20$	$K_{UR} = 35$
Velocità dell'aria	$K_{va} = 15$	$K_{va} = 10$
Radiazione solare	$K_G = 20$	$K_G = 15$

Gli scostamenti calcolati (in riferimento al punteggio tra 0 e 100) tra descrittori e indice in relazione alla scelta operata sui valori dei fattori di ponderazione sono inferiori ai 20 punti. Questo risultato è dovuto alla maggiore importanza attribuita in ogni caso all'influenza della temperatura e dell'umidità relativa sul conseguimento di una condizione di benessere.

Il grafico in figura 2 mette a confronto per una delle città considerate (Trento) il risultato della valutazione delle condizioni climatiche mensili mediante i descrittori e l'indice di qualità ambientale (IQA). Dalla figura si può osservare che non in tutti i casi è stato possibile calcolare ciascun descrittore, in quanto non applicabile (fuori del range di applicazione): la maggior parte dei descrittori permette la sola valutazione in periodo estivo o invernale. Inoltre, in alcuni casi i limiti, soprattutto per la temperatura in periodo invernale, non sono compatibili con i valori rilevati.

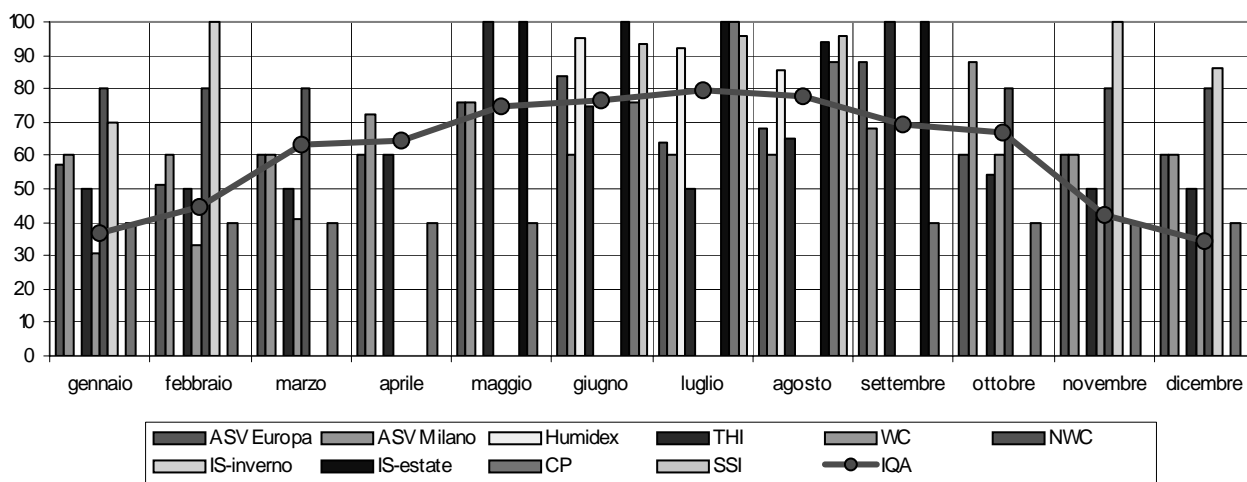


Figura 2 – Valutazione delle condizioni climatiche mediante descrittori ed indice di qualità ambientale

Il confronto tra le quattro città analizzate in termini di IQA è riportato in figura 3, dalla quale emerge che complessivamente uno stesso giudizio globale in relazione ai quattro parametri ambientali si raggiunge per le città di Lodi e Trento, mentre Genova risulta più uniforme, anche se il giudizio si attesta su valori mediamente più bassi in estate e più alti in inverno.

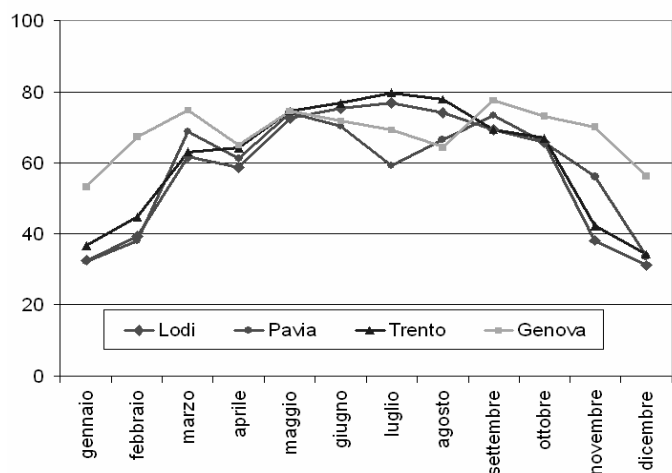


Figura 3 – Confronto su base mensile dell'IQA nelle quattro città considerate

Da prime valutazioni sembra che la sensibilità dell'indice alle variazioni delle diverse grandezze sia accettabile in relazione all'entità delle variazioni stesse e che quindi possa fornire un giudizio sufficientemente equilibrato su situazioni nelle quali non tutte le quattro grandezze varino in modo uniforme.

E' stata quindi svolta un'analisi dei dati rilevati da tre centraline della stessa città (Genova) per valutare le differenti condizioni che si possono riscontrare in una stessa città. I risultati ottenuti non sono necessariamente ovvii, in relazione ai valori assunti dall'IQA.

I risultati sono riassunti in figura 4, in termini di IQA medio annuale, calcolato sulla base di dati medi mensili, calcolando per ogni mese ciascun indicatore e l'indice.



Figura 4 – IQA medio annuale calcolato in tre punti della città di Genova

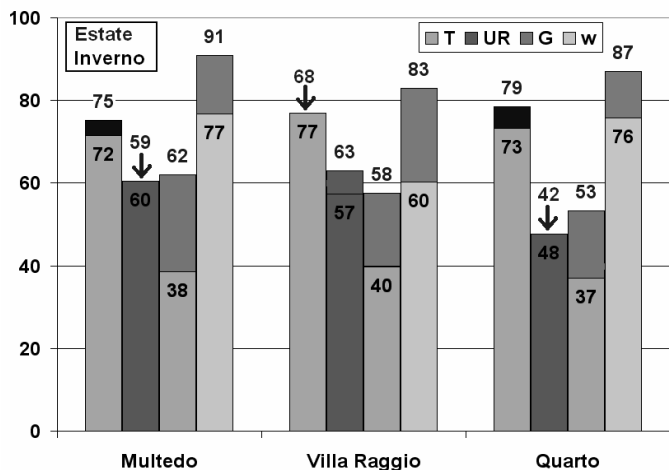


Figura 5 – Valori medi degli indicatori nelle tre posizioni di Genova

In figura 5 è riportato il dettaglio relativo al valore di ciascun indicatore mediato sui mesi tra Ottobre e Marzo (pedice inv), rispetto ai sei mesi più caldi (Aprile-Settembre, pedice est). Si nota che in linea di massima tutti gli indicatori raggiungono valori più elevati di gradimento nel periodo estivo, ad eccezione dell'umidità relativa, che in due postazioni su tre è leggermente inferiore. In tutti i casi l'indicatore estivo per radiazione solare e vento è maggiore nel periodo più caldo.

Complessivamente, tenuto conto che i fattori di ponderazione attribuiscono un'importanza inferiore ai contributi di questi due elementi, gli indici globali riferiti ai due periodi non si differenziano molto, se ci si riferisce alla città di Genova (figura 6). Questo non avviene per le altre città considerate, nelle quali le condizioni nel semestre "invernale" risultano più distanti dalle condizioni ottimali rispetto a quelle estive, che peraltro sono confrontabili, se non migliori rispetto a quelle di Genova.

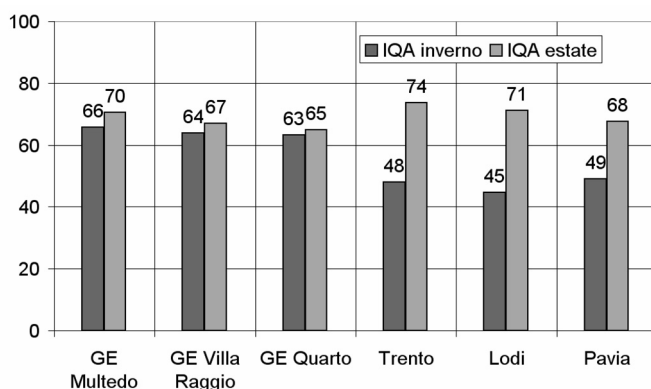


Figura 6– Valori medi dell'IAQ (estivo-invernale)

## CONSIDERAZIONI SULLE VALUTAZIONI EFFETTUATE

Una nota particolare merita il confronto con il progetto RUROS: sebbene si possano individuare diverse analogie, alcune differenze riguardano la valutazione di aspetti relativi ad indici con i quali si intende confrontare i risultati ottenuti.

In questo infatti manca una valutazione architettonica e paesistica sia degli spazi aperti (valutati sostanzialmente dal

punto di vista del comfort ambientale) sia degli edifici. L'approccio infatti è più incentrato su aspetti termoisometrici e di comfort, indipendentemente dalla qualità architettonica del sito. Tuttavia alcuni indicatori di qualità "ambientale" in senso più ampio (traffico per l'influenza sull'inquinamento acustico, verde con funzione bioclimatica etc.), si avvicinano a quanto considerato nella metodologia in studio.

Dovrebbero però essere più in rilievo anche ad aspetti relativi alla fruibilità sociale, con un corretto peso nel giudizio complessivo sulla qualità.

## CONCLUSIONI

La maggior parte dei descrittori/indicatori disponibili in letteratura non tiene conto contemporaneamente di un numero significativo di parametri, quali temperatura, umidità, velocità dell'aria, radiazione solare, ma solo di alcuni e può quindi fornire un'indicazione parziale della qualità dell'ambiente esterno. Oltre a ciò è difficile trovare descrittori che permettano di formulare una valutazione uniforme nell'arco dell'intero anno, in quanto alcuni di essi valgono solo per condizioni estive, altri per quelle invernali. Spesso le condizioni climatiche delle stagioni intermedie non forniscono risultati particolarmente attendibili.

La realizzazione di indicatori confrontabili tra loro mediante coefficienti di ponderazione si dimostra utile per la valutazione dell'incidenza complessiva di fattori di tipo ambientale nell'ambito della qualità urbana.

L'indice di qualità ambientale è stato realizzato sulla base di indagini a largo spettro sui parametri che influenzano il giudizio globale sullo stato dell'ambiente esterno. Esso permette di sintetizzare il giudizio sulle condizioni climatiche dell'ambiente esterno esprimendolo come un valore in una scala da 0 a 100.

Il criterio adottato e la calibrazione dei pesi relativi e dei fattori di ponderazione sembra sufficientemente affidabile, in quanto verificato sulla base di strumenti disponibili in letteratura. Esso sembra particolarmente duttile da poter essere omogeneizzato con approcci paralleli che coinvolgono l'inquinamento acustico, atmosferico, la qualità urbanistica, architettonica, ed aspetti correlati con la salute e la percezione di essa da parte del singolo individuo.

La costruzione di analoghe scale di giudizio in relazione a problemi di tipo differente è in via di elaborazione, come anche l'approfondimento delle valutazioni tramite l'indice di qualità ambientale, per verificare la necessità di una valutazione differenziata in alcuni periodi di tempo (semestrali, trimestrali, mensili), che potrebbero descrivere in modo più dettagliato lo stato di maggiore o minore benessere, come evidenziato nelle elaborazioni relative alle diverse centraline su base semestrale.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Dr.ssa Cristina Bosio dell'ARPA Pavia, il Prof. Dr. Cesare Tomasoni, Sezione Centrale di Agronomia, Istituto Sperimentale per le Colture Foraggere (I.S.C.F.) di Lodi, il Dr. Enrico Daminelli, Amministrazione Provinciale di Genova, Area 08 – Ambiente, Ufficio Elaborazione Dati Ambientali di Genova.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- 1 A. Magrini, L. Cattani “Indicatori termoigrometrici e indici per la valutazione della qualità urbana” Congresso Nazionale ATI, Perugia, 12-15 Settembre 2006.
- 2 RUROS - Progettare gli spazi aperti nell'ambiente urbano: un approccio bioclimatico 5° Programma EU, Key Action 4 “City of tomorrow and cultural heritage”.
- 3 P.Orlando, M.Sartini, M.L.Cristina “Qualità urbana e qualità della salute. Un approccio critico ai sistemi di misura” 6°Congresso Nazionale CIRIAF, 7-8 Aprile 2006, Perugia
- 4 A.Magrini “Livelli di rumore ed indicatori acustici nella valutazione della qualità urbana e della percezione della salute”, 6°Congresso Nazionale CIRIAF, 7-8 Aprile 2006, Perugia.
- 5 Theodore Stathopoulos, Hanqing Wu, John Zacharias Outdoor human comfort in an urban climate. Building and Environment 39 (2004) 297 – 305.
- 6 Jennifer Spagnolo, Richard de Dear, “A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia”, Building and Environment 38 (2003) 721 – 738.
- 7 Michael A. Humphreys, J. Fergus Nicol, “The validating of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments, Energy and Buildings 34 (2002) 667-684.
- 8 A.Ghia “Metodologia di analisi della qualità urbana: indicatori e sistema di valutazione”, 6°Congresso Nazionale CIRIAF, 7-8 Aprile 2006, Perugia.
- 9 Raccomandazione della Commissione, 10 luglio 2003, Orientamenti per l'applicazione del regolamento (CE) n. 761/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio sull'adesione volontaria delle organizzazioni a un sistema comunitario di ecogestione e audit (EMAS) concernente la scelta e l'uso di indicatori di prestazioni ambientali, 2003/532/CE.



## STUDIO DELL'INQUINAMENTO DA CO<sub>2</sub> NEL CENTRO URBANO DELLA CITTA' DI MESSINA

G. Cannistraro<sup>1,2</sup>, L. Ponterio<sup>2</sup>, D. Germanò<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Siciliano per le Ricerche Atmosferiche e di Fisica dell'Ambiente (C.S.R.A.F.A.),  
contr.da Papardo, salita Sperone, 98100 Messina, Italia

<sup>2</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria, Università di Messina,  
contr.da Papardo, Salita di Dio, 98100, Messina, Italia

### SOMMARIO

In questo lavoro vengono riportati i risultati di un monitoraggio dei livelli di concentrazioni di anidride carbonica, dei parametri climatici, temperatura esterna, umidità relativa, velocità e direzione del vento e pressione atmosferica, e dei flussi di traffico rilevati nel centro urbano della città di Messina nell'anno 2006. L'area di monitoraggio si estende dagli approdi della Società "Caronte", lungo la zona costiera, fino agli svincoli autostradali situati nella fascia collinare. Le aree di monitoraggio presentano caratteristiche eterogenee sia per quanto riguarda i flussi di traffico che le attraversano che per la loro conformazione urbanistica. I dati acquisiti di concentrazioni di biossido di carbonio sono stati confrontati con i parametri climatici, e con i flussi di traffico rilevati durante il monitoraggio.

### INTRODUZIONE

L'uso indiscriminato delle risorse, senza preoccupazioni per gli effetti collaterali sulla salute dell'uomo e dell'ambiente, l'incremento demografico incontrollato e l'elevata densità abitativa di molte aree urbane sono tutti fenomeni che hanno portato all'evoluzione di forme di inquinamento locale e globale di grossa entità. Il raggiungimento degli obiettivi del Protocollo di Kyoto, ossia la riduzione dell'emissione dei gas serra di almeno il 5% tra il 2008 e il 2012, è di fondamentale importanza per migliorare lo stato di salute del nostro pianeta. Un contributo primario all'inquinamento dell'atmosfera è dovuto al settore trasporti, che, in Europa, è la causa dell'emissione del 74% di monossido di carbonio, del 55% di ossidi di azoto e del 47% di idrocarburi volatili [1]. Accanto ai gas di scarico di auto e ciclomotori, le attività industriali e la produzione di energia termoelettrica sono i peggiori nemici dell'aria. Il biossido di carbonio, il metano, gli ossidi di azoto e i clorofluorocarburi, sono i principali responsabili dell'"effetto serra"; tali inquinanti vengono rilasciati nell'ambiente sia da fonti mobili, quali i veicoli del settore trasporti, sia da fonti non mobili, quali industrie, abitazioni domestiche, aziende agricole e discariche di rifiuti, che infine da fonti collegate alla produzione di energia. Le emissioni dovute al settore dei trasporti assumono particolare importanza a causa del loro rapido tasso di crescita: infatti, in Europa i trasporti su strada di merci sono cresciuti del 54% dal 1980, i trasporti su strada di passeggeri del 46% negli ultimi dieci anni e i trasporti aerei di passeggeri sono cresciuti del 67% negli ultimi dieci anni [2]. Si può ipotizzare che la situazione ambientale vada sempre peggiorando, considerato che il traffico veicolare contribuisce quasi per un terzo alle emissioni di CO<sub>2</sub> [3] e tali valori sono destinati ad aumentare negli anni. Nell'area

metropolitana di Parigi, ad esempio, le emissioni di SO<sub>2</sub> sono diminuite di 20 volte le concentrazioni raggiunte negli anni '50, le concentrazioni di CO e di idrocarburi totali sono quattro volte più basse rispetto a 10 anni fa, i valori in aria di particolato PM<sub>10</sub> sono stabili, mentre le concentrazioni di biossido di carbonio sono aumentate rispetto agli anni precedenti [3]. Tali aumenti sono pari al 75% dal 1973 al 2000, e raggiungeranno circa il 50% entro il 2020 [3]. L'Agenzia Svizzera per l'ambiente ha valutato che le emissioni di biossido di carbonio ed ossidi di azoto sono rispettivamente 10 e 12 volte più alte quelle raggiunte durante la prima metà del XX secolo [4]. I cambiamenti nella composizione chimica dell'atmosfera delle grandi città sono determinati principalmente dagli inquinanti emessi dal traffico veicolare e tale problema diventa più grave se si considera le interdipendenze di tali inquinanti con i parametri meteorologici.

### 1 LA CAMPAGNA DI MONITORAGGIO NEL CENTRO URBANO DI MESSINA

Al fine di monitorare nel centro urbano della città di Messina, l'inquinamento ambientale da biossido di carbonio, inquinante responsabile dell'effetto serra e, pertanto, dell'aumento della temperatura del pianeta, il Centro Siciliano per le Ricerche Atmosferiche e di Fisica dell'Ambiente (C.S.R.A.F.A) e il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Messina, hanno effettuato una campagna di monitoraggio nel periodo dal 18.01.2006 al 19.01.2006.

Durante il campionamento è stata rilevata la concentrazione in ppm del biossido di carbonio presente nell'aria esterna, nel contempo sono stati monitorati parametri termometrici

quali temperatura, pressione e umidità relativa dell'aria, e climatici quali intensità e direzione prevalente del vento.

L'area di monitoraggio si estende dagli approdi della Società "Caronte" fino a Piazza Cairolì, lungo la zona costiera, e dagli svincoli autostradali fino a Viale Italia, nella fascia collinare.

Sono state scelte 8 zone di monitoraggio, con caratteristiche eterogenee sia per quanto riguarda i flussi di traffico che le attraversano che per la loro conformazione urbanistica, le relative stazioni di monitoraggio sono state posizionate come indicato nella tabella n. 1.

Tab. n. 1 – Stazioni di monitoraggio e localizzazione

Stazione di monitoraggio	Localizzazione
1- CARONTE	Viale della Libertà
2- BOCCETTA	Viale Bocchetta (imbocco autostrada)
3- ARCHIMEDE	Viale Bocchetta (Liceo Scientifico Archimede)
4- XX SETTEMBRE	Piazza XX Settembre
5- ITALIA	Viale Italia
6- UNIVERSITÀ	Piazza Pugliatti
7- CAIROLI	Piazza Cairolì
8- GARIBALDI	Via Garibaldi (incrocio Torrente Trapani)

## 2. LA STAZIONE METEOROLOGICA

Per effettuare i rilievi delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> e dei parametri termoisometrici e climatici, è stata utilizzata una stazione meteorologica, composta da un sensore spettrofotometrico, un tacogonioanemometro, un termoisigrometro, un barometro e una centralina di acquisizione dati (fig. 1).



Fig. 1: Stazione meteorologica utilizzata per il monitoraggio

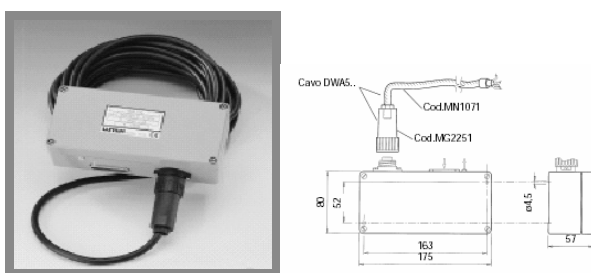


Fig. 2: Foto e disegno meccanico del sensore spettrofotometrico

Il sensore spettrofotometrico (fig. n. 2), è utilizzato per la misurazione delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera. Il suo principio di misurazione si basa sul metodo ad infrarosso.

Il tacogonioanemometro, comprende in un unico strumento i sensori per la misura di velocità e direzione del vento (fig. n. 3).

Il termoisigrometro (fig. n. 4) è costituito da due sonde, una per la misura della temperatura dell'aria e l'altra per la misura dell'umidità relativa della zona. Gli elementi sensibili nelle due sonde sono protetti per mezzo di un doppio schermo antiradiante.

Il barometro termocompensato (fig. n. 5), utilizzato per la misura della pressione del sito di rilevamento, è predisposto ad applicazione con connessione a sistemi di misura che accettano segnali digitali.

Il barometro funziona in base al principio piezometrico, ovvero su una lamina di silicio è depositato un film di resistenze a ponte; al variare della pressione varierà la deformazione della piastrina e conseguentemente la resistenza del sistema. Esso dispone inoltre di un sistema di compensazione termica che ne riduce notevolmente la deriva. La centralina di acquisizione dati, acquisisce i valori puntuali delle grandezze e calcola l'elaborato statistico allo scadere della base temporale programmata.

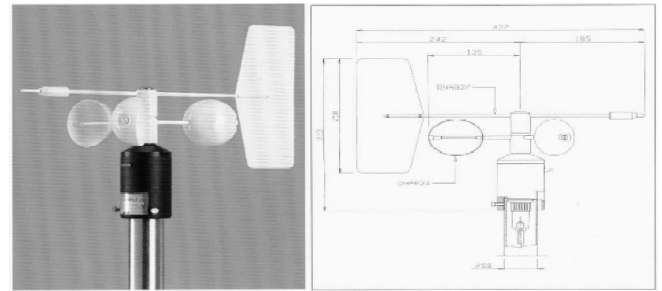


Fig. 3: Foto e disegno meccanico del tacogonioanemometro

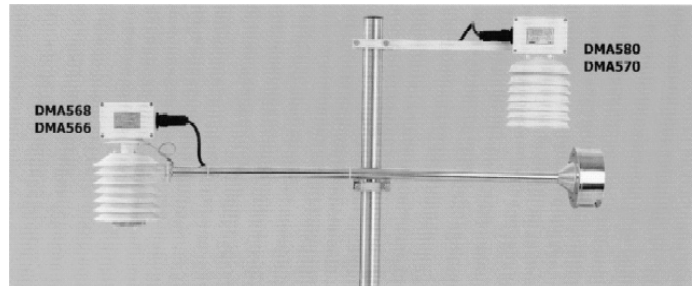


Fig. 4: Foto del termoisigrometro

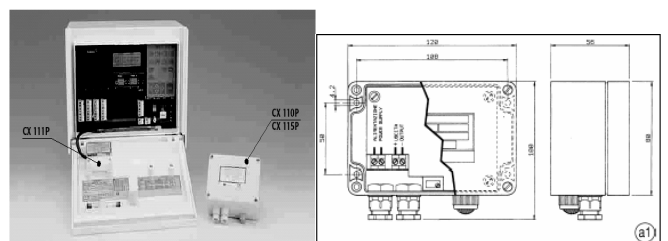


Fig. 5: Foto e disegno del barometro termocompensato

### 3. RISULTATI DEL MONITORAGGIO

Dall'analisi dei dati del monitoraggio di biossido di carbonio riportati in tabella (tab. n. 2) si nota come le concentrazioni più elevate di tale inquinante sono state misurate nelle stazioni Bocchetta, Caronte ed Archimede. Tale risultato è in accordo con gli alti valori dei flussi di traffico rilevati in tali zone, essendo infatti le tre postazioni situate in arterie percorse da alti flussi veicolari. Le stazioni Bocchetta ed Archimede, infatti, si trovano sul viale Bocchetta, punto di snodo per il traffico che si dirige o che proviene dalle autostrade verso le altre zone della Sicilia, mentre la stazione Caronte è situata in prossimità dell'approdo delle navi traghetto della società "Caronte", punto di sbarco del traffico veicolare da e per il continente. Un'altra zona del centro urbano che si presenta soggetta ad elevati valori di biossido di carbonio è l'area circostante il Viale Italia.

Tab. n. 2 – Concentrazione medie e massime di biossido di carbonio nelle 8 stazioni nel periodo di campionamento

STAZIONE	VALORI MEDI NEL PERIODO DI CAMPIONAMENTO	VALORI MASSIMI NEL PERIODO DI CAMPIONAMENTO
CARONTE	359,875	436
BOCCHETTA	342,125	430
ARCHIMEDE	323,4875	400,9
UNIVERSITA'	307,875	325
XX SETTEMBRE	309,75	363
CAIROLI	313,63	351
ITALIA	331,4	400
GARIBALDI	309,125	328

### 4. INFLUENZA ED INTERDIPENDENZA DEI PARAMETRI MONITORATI

E' stato eseguito uno studio sulla correlazione tra emissioni di biossido di carbonio e flussi di traffico rilevati nelle stazioni di monitoraggio.

Durante la campagna di monitoraggio sono stati rilevati nelle varie stazioni il numero di mezzi leggeri, mezzi pesanti e motocicli circolanti durante il periodo di campionamento.

Tali valori sono stati unificati nel numero di veicoli equivalenti tramite la seguente formula:

$$mL + 2*mp + 0.5*m$$

con

mL = mezzi leggeri;

mp = mezzi pesanti;

m = motocicli.

Il confronto è stato effettuato tra i valori medi delle concentrazioni di biossido di carbonio e i valori medi di veicoli equivalenti in tutte le stazioni di monitoraggio (fig. n. 9).

La correlazione tra i due valori mostra un coefficiente positivo pari a 0.532, risultato che dimostra la stretta dipendenza tra le emissioni di CO<sub>2</sub> ed il traffico stradale.

E' stata inoltre eseguita un'analisi di regressione tra i due parametri, concentrazioni di biossido di carbonio e flussi di traffico, ricavando la seguente relazione:

$$[CO_2] = 0.122 * VE + 328.687$$

in cui

VE = numero di veicoli equivalenti.

Dall'analisi dei rilievi effettuati è inoltre scaturita una stretta interdipendenza tra i livelli di concentrazione di biossido di carbonio nelle varie stazioni di monitoraggio e la velocità del vento nelle singole stazioni.

Per ogni stazione è stata effettuata uno studio di regressione lineare che studio ha rivelato una correlazione negativa con coefficiente elevato pari a - 0.767 tra i due parametri.

Un esempio è mostrato in fig. 8 per la stazione di monitoraggio Garibaldi per la quale è stata calcolata la retta di regressione:

$$[CO_2] = - 14.007* [V] + 323.675$$

La correlazione negativa è un dato atteso viste le caratteristiche di ventosità dello stretto di Messina, le quali consentono la riduzione delle concentrazioni di inquinanti nell'area considerata.

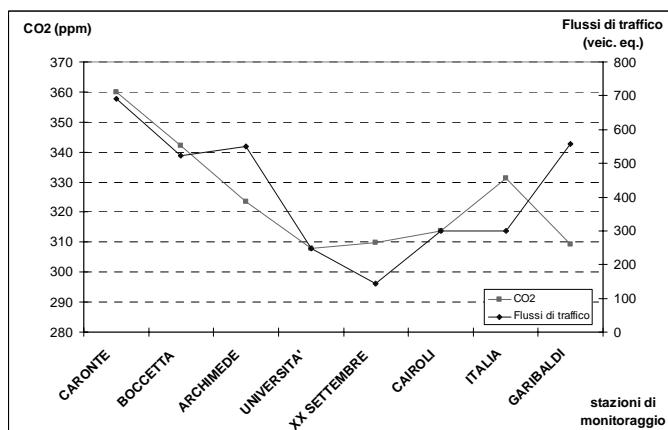


Fig. 8: Confronto tra i valori di CO<sub>2</sub> e i flussi di traffico

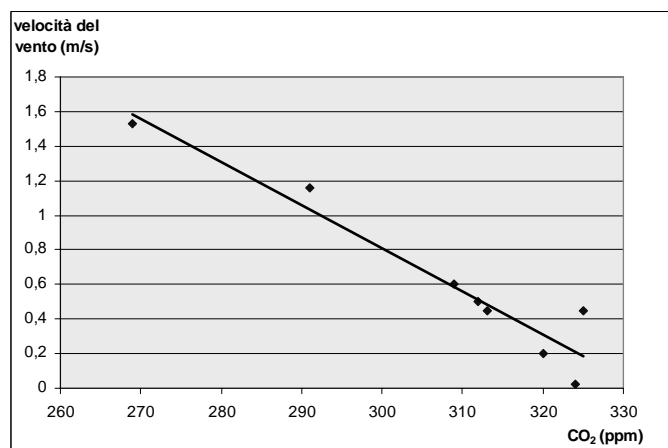


Fig. 9: Correzione tra concentrazioni di CO<sub>2</sub> e velocità del vento nella stazione Garibaldi

### CONCLUSIONI

In questo lavoro vengono riportati i risultati di un monitoraggio dei livelli di concentrazioni di anidride carbonica, inquinante responsabile dell'effetto serra, e dei parametri climatici, temperatura esterna, umidità relativa, velocità e direzione del vento e pressione atmosferica, e dei flussi di traffico rilevati nel centro urbano della città di Messina nell'anno 2006.

Per il monitoraggio è stata utilizzata una stazione meteorologica composta da un sensore spettrofotometrico, tacogonioanemometro, un termogigrometro, un barometro termocompensato e una centralina di acquisizione dati.

L'analisi dei dati rilevati ha mostrato come le concentrazioni più elevate di biossido si sono riscontrate nelle stazioni di monitoraggio maggiormente interessate dal traffico veicolare, quali le stazioni Bocchetta, Archimede e Caronte. Le prime due situate all'imbocco dell'autostrada e pertanto interessate dal traffico in ingresso ed in uscita dalla città di Messina verso le altre zone della Sicilia, l'ultima vicina all'approdo dei traghetti e pertanto punto di snodo del traffico veicolare da e per il continente.

L'analisi dei dati di concentrazioni di biossido di carbonio rilevate nell'area di monitoraggio e flussi di traffico ha presentato un buon coefficiente di correlazione.

Per quanto riguarda l'influenza dei parametri climatici con le concentrazioni di biossido di carbonio, risultati interessanti sono scaturiti dal confronto di tale inquinante con la velocità del vento.

Anche in questo caso è stata eseguita una correlazione tra i dati che ha fornito un coefficiente di correlazione negativo, risultato atteso viste le caratteristiche di ventosità dello stretto di Messina, le quali consentono la riduzione delle concentrazioni di inquinanti nell'area considerata.

## BIBLIOGRAFIA

1. [www.dirittisociali.org](http://www.dirittisociali.org)
2. [www.europarl.europa.eu](http://www.europarl.europa.eu)
3. Joumard R., The stakes of air pollution in the transport sector from the French case, *Atmospheric Environment*, vol. 39, pp. 2491–2497, 2005;
4. O.F.E.F.P., Emissions polluantes dues a` l'activite´ humaine en Suisse de 1900 a` 2010, *Cahiers de l'Environnement*, vol. 256, p. 122, 1995;

**SESSIONE**

**SVILUPPO SOSTENIBILE  
E QUALITA' DELL'AMBIENTE**



## INTEGRAZIONE DEGLI STRUMENTI DI POLITICA AMBIENTALE IN UN AREA INDUSTRIALE

M. Dell'Isola<sup>1</sup>, E. Di Girolamo<sup>1</sup>, A. Frattolillo<sup>1</sup>, A. Forni<sup>2</sup>, F. Frenquellucci<sup>2</sup>, I. Olivetti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Meccanica, Strutture, Ambiente e Territorio (DiMSAT)  
Università di Cassino, Via G. Di Biasio, 43, 03043, Cassino (FR), Italia  
[e.digirolamo@unicas.it](mailto:e.digirolamo@unicas.it), [dellisola@unicas.it](mailto:dellisola@unicas.it), [frattolillo@unicas.it](mailto:frattolillo@unicas.it)  
ENEA UDA-ADVISOR C.R. Frascati, Via E. Fermi, 45, 00044, Frascati (Rm), Italia  
[forni@frascati.enea.it](mailto:forni@frascati.enea.it), [frenquellucci@faenza.enea.it](mailto:frenquellucci@faenza.enea.it), [olivetti@frascati.enea.it](mailto:olivetti@frascati.enea.it)

### SOMMARIO

Il Progetto LIFE-SIAM [1] prendendo a riferimento le Direttive Comunitarie specificatamente applicabili, si pone proprio l'obiettivo di definire un nuovo Modello di Area Industriale Sostenibile i cui obiettivi sono: i) l'integrazione dei principi della sostenibilità nella localizzazione, nell'insediamento e nella gestione delle aree industriali; ii) lo sviluppo di metodi innovativi, basati su di un approccio preventivo, per ridurre l'impatto ambientale e favorire lo sviluppo di tecnologie pulite in queste aree; iii) la promozione del miglioramento continuo delle prestazioni ambientali, complessivamente delle intere aree industriali e, individualmente, delle singole imprese locali, con particolare riguardo a quelle di media e piccola dimensione; iv) l'incoraggiamento allo sviluppo di un clima collaborativo e di efficaci rapporti tra le autorità locali, i cittadini e l'industria; la creazione di condizioni favorevoli per incrementare l'occupazione, formare nuove figure professionali in grado di progettare e gestire le aree industriali. Questi obiettivi vengono perseguiti attraverso la definizione e l'applicazione di un Modello di Area Industriale Sostenibile, basato sull'uso, l'adattamento e l'integrazione di tre differenti strumenti comunitari di politica ambientale: la Valutazione Ambientale Strategica [2]; l'EMAS [3] e la Contabilità Ambientale ed il Libero Accesso all'Informazione sull'Ambiente [4].

In tale lavoro vengono approfondite le problematiche di integrazione delle politiche ambientali relativamente ad aree industriali e/o organizzazioni territoriali con particolare riferimento al caso di studio della Provincia di Frosinone. In particolare vengono definiti ed analizzati il grado di integrazione verticale (dalle direttive UE alle azioni locali) ed orizzontale (dal partenariato per la governance ai forum di AG21L [5]) dei principi della sostenibilità e della governance nel territorio a partire dalla localizzazione e gestione delle aree industriali al fine di mettere in evidenza le difficoltà attuative nell'integrazione dei differenti strumenti normativi comunitari volontari all'interno di modelli (come la governance) o di policy (come lo sviluppo sostenibile) e consentire un loro approccio innovativo quanto più possibile inserito nella pianificazione e gestione territoriale.

### INTRODUZIONE ED OBIETTIVI

Il sistema produttivo italiano deve rispondere alle sollecitazioni internazionali e locali, che vanno in direzioni differenti: i) quelle internazionali tendono a ridurre i tempi di risposta sotto il profilo della quantità e qualità dei prodotti realizzati; ii) quelle locali tendono a inserire garanzie, espressamente richieste, di carattere sociale, economico e ambientale.

Questo richiede la messa a punto di metodologie di intervento, per renderlo più efficiente nel rispondere alle sollecitazioni internazionali e locali. L'Unione Europea ha cercato di definire un quadro normativo coerente, quali EMAS [3], VAS [2], le direttive in tema di informazione sui temi ambientali [4], che, se applicate, possono rappresentare una risposta unificante delle due sollecitazioni.

Malgrado gli esperti diano grande importanza all'approccio volontario, esso però rimane allo stato attuale, poco frequentato e viene applicato con notevoli difficoltà.

Questo studio intende analizzare le problematiche applicative e evidenziare un approccio metodologico che faciliti l'adozione volontaria delle norme ed aumenti l'efficienza del sistema.

I principali obiettivi dello studio sono nella linea di ricerca storicamente individuata dall'Agenzia per lo sviluppo sostenibile dell'ENEA e sono parte integrante del progetto LIFE-SIAM 2005 [1]. Sinteticamente sono: 1) analizzare il grado di integrazione verticale (dalle direttive UE alle azioni

locali) ed orizzontale (dal partenariato per la governance ai forum di Agenda 21 Locale (AG21L) [5]) dei principi della sostenibilità e della governance nel territorio a partire dalla localizzazione e gestione delle aree industriali; 2) analizzare i metodi sperimentati di programmazione territoriale condivisa dello sviluppo, basati su di un approccio multidisciplinare, comprendente partenariato, programmazione, valutazione e monitoraggio; 3) analizzare il rapporto tra ASI (Area di Sviluppo Industriale) e territorio e le problematiche della sua evoluzione verso una sostenibilità; 4) analizzare i livelli di "know how" gestionale e progettuale necessari allo sviluppo di un clima collaborativo e di efficaci rapporti tra le Autorità Locali, i cittadini, il sistema produttivo, gli esperti ed il mondo scientifico e le dimensioni professionali necessarie e richieste al fine di formare nuove figure professionali in grado di progettare e gestire la governance e lo sviluppo sostenibile, a partire dalle aree industriali.

Questi obiettivi di analisi sono stati perseguiti attraverso la verifica sul campo dello stato dell'ambiente e dell'applicazione, adattamento e integrazione di differenti strumenti comunitari di politica ambientale, nelle procedure di governance attuate sul territorio e il confronto tra alcuni casi di studio [6-8].

Lo studio intende dare un contributo per mettere in luce le difficoltà attuative nell'integrare differenti strumenti normativi comunitari volontari all'interno di modelli, come la governance, o di policy, come lo sviluppo sostenibile, e consentire un loro approccio innovativo, quanto più possibile

inserito nella pianificazione e gestione territoriale.

Lo studio intende verificare inoltre come nelle Istituzioni Locali, nella fattispecie della provincia di Frosinone, si sia percepita la definizione e l'applicazione di un "Modello di Area Industriale Sostenibile (AIS)" [1], e come tale obiettivo sia inserito nella "governance territoriale".

## **ELEMENTI DI BASE**

### **Gli strumenti di politica ambientale**

Le politiche ambientali negli ultimi anni hanno spinto con forza in direzione dell'introduzione di un approccio alla gestione delle problematiche ambientali a carattere volontario [1-4]. Oggi, pertanto, accanto all'usuale approccio teso a disciplinare il rapporto tutela dell'ambiente-imprese fondato sul rispetto delle normative e delle prescrizioni in materia (command and control), esiste tutta una serie di strumenti volontari da parte delle imprese (quali i sistemi di gestione ambientale e le relative certificazioni, i finanziamenti verdi, le ecoetichettature eccetera), contenenti requisiti e modalità operative, che possono essere seguiti per il miglioramento delle prestazioni ambientali. Fra essi emergono per importanza gli standard relativi all'organizzazione e disciplina di sistemi di gestione ambientale e le relative certificazioni rilasciate da soggetti terzi ai sensi del Regolamento Europeo EMAS 761/2001/CE [3]. La realizzazione del sistema di gestione ambientale segue la stessa ratio che contraddistingue la norma ISO 14001 [9]. Tuttavia il Regolamento Europeo EMAS 761/2001 introduce due aspetti sostanziali di carattere innovativo: la pubblicazione della dichiarazione ambientale all'esterno e disponibile per chiunque sia interessato ed i verificatori che sono accreditati da un Comitato Interministeriale (Comitato Ecolabel/Ecoaudit) che si avvale del supporto tecnico dell'APAT.

Il 28/01/2005 il Comitato Ecolabel/Ecoaudit – Sezione EMAS – ha approvato un documento sull'applicazione del Regolamento 761/2001 [10], nel quale si sottolinea l'importanza di estendere l'utilizzo di strumenti volontari di politica ambientale ad ambiti produttivi omogenei e più in generale ad aree industriali (o distretti) e soggetti gestori (tipicamente Consorzi).

### **La Valutazione Ambientale Strategica – Direttiva 2001/42/CE**

La Direttiva Europea 2001/42/CE [11] concernente "la valutazione degli effetti di determinati piani e programmi sull'ambiente naturale", cosiddetta direttiva VAS entrata in vigore il 21 luglio 2001, rappresenta un importante passo avanti nel contesto del diritto ambientale europeo. Essa si pone come obiettivo quello di garantire un elevato livello di protezione dell'ambiente e individua nella Valutazione Ambientale Strategica lo strumento per l'integrazione delle considerazioni ambientali all'atto dell'elaborazione e dell'adozione di piani e programmi al fine di promuovere lo sviluppo sostenibile. In tal modo garantisce che gli effetti ambientali derivanti dall'attuazione di determinati piani e programmi (art. 3), siano presi in considerazione e valutati durante la loro elaborazione e prima della loro adozione.

La Valutazione Ambientale Strategica, quindi, si delinea come un processo sistematico inteso a valutare le conseguenze sul piano ambientale delle azioni proposte – politiche, piani o iniziative nell'ambito di programmi nazionali, regionali e

locali - in modo che queste siano incluse e affrontate, alla pari delle considerazioni di ordine economico e sociale, fin dalle prime fasi (strategiche) del processo decisionale. In altre parole, la Valutazione Ambientale Strategica assolve al compito di verificare la coerenza delle proposte programmatiche e pianificatorie con gli obiettivi di sostenibilità, a differenza della Valutazione Impatto Ambientale che si applica a singoli progetti di opere.

L'elaborazione delle procedure individuate nella Direttiva 2001/42/CE rappresenta uno strumento di supporto sia per il proponente che per il decisore per la formazione degli indirizzi e delle scelte di pianificazione fornendo opzioni alternative rispetto al raggiungimento di un obiettivo mediante la determinazione dei possibili impatti delle azioni prospettate.

### **La Direttiva 2003/4/CE in materia di accesso ai documenti ambientali**

Il Parlamento Europeo ed il Consiglio dell'Unione Europea in data 28 gennaio 2003 hanno adottato la Direttiva n. 2003/4/CE [4] in materia di accesso al pubblico all'informazione ambientale che abroga la Direttiva n. 90/313/CEE. La recente Direttiva, recepita il 14/2/2005, amplia notevolmente l'ambito applicativo del diritto di accesso del pubblico all'informazione ambientale ed estende notevolmente, rispetto alla disciplina in vigore, sia da un punto di vista quantitativo che qualitativo, la definizione di "informazione ambientale", arrivando a ricomprendervi, nell'articolo 2, "lo stato degli elementi dell'ambiente (aria, acqua atmosfera, suolo, territorio, paesaggio, siti naturali, le zone costiere e marine, la diversità biologica), le politiche, lo stato della salute e della sicurezza umana, i fattori di impatto e rischio, i siti di interesse culturale.

Parallelamente l'unione Europea prevede che le autorità pubbliche siano tenute a rendere disponibile l'accesso all'informazione ambientale a chiunque ne faccia richiesta, senza che il richiedente debba dichiarare il proprio interesse.

L'informazione ambientale è messa a disposizione del richiedente quanto prima possibile o al più tardi entro un mese dal ricevimento, da parte dell'autorità pubblica della richiesta del richiedente. Se il volume e la complessità delle informazioni richieste sono tali che non è possibile soddisfare la richiesta entro questo termine, è accordato un termine di due mesi a decorrere dalla data di ricevimento della richiesta.

In questo contesto gli Enti Locali sono da una parte, un soggetto attivo di diffusione e promozione dei sistemi di gestione a carattere volontario, e dall'altra sono essi stessi destinatari delle norme contenute nel Regolamento e quindi organizzazioni registrabili EMAS. Inoltre essi sono anche in grado di pianificare e sviluppare la politica ambientale del proprio territorio potendo anche contare sullo strumento sperimentato di AG21L [5].

## **INSEDIAMENTI PRODUTTIVI ITALIANI**

### **Aree Ecologicamente Attrezzate (AEA)**

L'area ecologicamente attrezzata è stata introdotta nell'ordinamento legislativo italiano dal D.Lgs. n. 112/98 (Bassanini), che prevede all'art. 26 che "le Regioni disciplinino, con proprie leggi, le aree industriali e le aree ecologicamente attrezzate, dotate delle infrastrutture e dei sistemi necessari a garantire la tutela della salute, della sicurezza e dell'ambiente".

L'introduzione di questo nuovo concetto di area produttiva, pensata in chiave ambientale, dotata di requisiti tecnici ed organizzativi finalizzati a minimizzare ed a gestire in modo integrato le pressioni sull'ambiente, nasce dalla necessità di sostituire il cosiddetto approccio "end of pipe" (abbattimento dell'inquinamento a fine ciclo) con il principio di precauzione e prevenzione dall'inquinamento. In particolare non si tratta di agire sulle specifiche dotazioni ambientali delle imprese, come avvenuto fino ad ora, ma di organizzare il sito produttivo in modo da agevolare, sia economicamente sia tecnicamente, le singole imprese insediate a realizzare i loro obiettivi ambientali, siano essi prescrittivi o volontari.

Le aree ecologicamente attrezzate devono essere progettate, realizzate e gestite sulla base di criteri di ecoefficienza, al fine di garantire un sistema di gestione integrato degli aspetti ambientali, la riduzione e la prevenzione dell'inquinamento dell'aria, dell'acqua e del suolo, la tutela della salute e della sicurezza nonché un miglioramento ambientale diffuso del territorio.

Gli impianti produttivi localizzati nelle aree ecologicamente attrezzate sono esonerati dall'acquisizione delle autorizzazioni concernenti l'utilizzazione dei servizi ivi presenti.

Più sinteticamente potremmo definire come elementi caratterizzanti di un'area industriale ecologicamente attrezzata quelli di seguito riportati: i) soggetto gestore delle infrastrutture, dei servizi e delle attrezzature in dotazione; ii) contenuti tecnologici e infrastrutturali di qualità; iii) gestione ambientale di qualità

Da questo modello le imprese facenti parte dell'area riceverebbero un beneficio che è maggiore della somma dei benefici che ogni compagnia avrebbe realizzato ottimizzando esclusivamente le proprie performances.

## Aree di Sviluppo Industriale

Le Aree di Sviluppo Industriale (così come disciplinate dalla L. 634/1957, L. 64/1986 e L. 317/1991 e s.m.i.) si possono invece articolare in più nuclei industriali identificando un territorio (ampio e tendenzialmente omogeneo) di pertinenza di più Comuni all'interno del quale sussistono le condizioni per attuare una trasformazione economico - ambientale compatibile con un processo di sviluppo industriale secondo linee predeterminate. Le A.S.I., come strumento di concentrazione, sono uno strumento capace di temperare insieme le esigenze sia generali sia scientifiche delle imprese per conseguire, al meglio determinati obiettivi, tra cui: i) l'ottimizzazione dell'offerta d'infrastrutture e di suoli; ii) la riduzione dei conflitti tra i richiedenti d'uso, dei suoli migliori, per ubicazione e locazione; iii) l'offerta dei servizi alle imprese; iv) la difesa ed il controllo ambientale.

In ogni ambito produttivo industriale il soggetto gestore assume un ruolo di primaria importanza. In particolare un'area industriale può essere gestita da due tipologie di Consorzi con personalità giuridica pubblica economica: il Consorzio industriale di "intermediazione immobiliare" e il Consorzio industriale "gestore di impianti". Il primo svolge esclusivamente un'attività di compravendita di lotti di terreno occupandosi della loro urbanizzazione primaria (strade, impianti di approvvigionamento idrico, allacci in fognatura etc..) ma senza amministrare o essere proprietario di infrastrutture consorziali. Rispetto al primo tipo di Consorzio, questo secondo soggetto gestore ha una capacità sicuramente maggiore nel controllo e nel miglioramento degli impatti ambientali generati dall'area industriale.

Un interessante studio sulla situazione del sistema produttivo e delle aree industriali è stato effettuato dall'ENEA per il Ministero dell'Ambiente dal quale si deduce una sintetica rappresentazione della situazione del sistema industriale nazionale sotto il profilo della sostenibilità, applicando lo schema DPSIR ed individuando sia gli elementi di impatto che alcuni elementi di risposta [12].

Una delle questioni ambientali più rilevanti del sistema produttivo attuale attiene al fatto che la dispersione in una altissima quantità di imprese delle varie attività, comporta una direttamente correlata altissima occupazione del territorio.

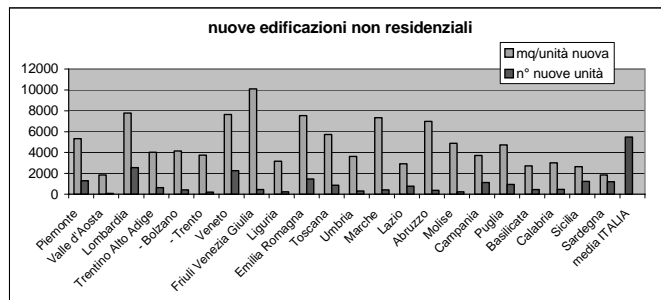


Figura 1: Crescita delle nuove edificazioni residenziali (Dati ISTAT 2000, elaborazione ENEA)

Si hanno attualmente due fenomeni relativi all'occupazione del suolo. Uno che vede prevalere nella nuova destinazione di aree industriali dismesse, le attività terziarie, quali commercio, ICT e consulenza aziendale di vario tipo; l'altro che vede le istituzioni locali di molti distretti negare le nuove licenze edilizie per nuovi capannoni.

Questo processo presenta una situazione diversa tra nord, sud e centro, a causa dei differenti livelli di industrializzazione, ma la nuova normativa nazionale sull'individuazione delle aree industriali ed aree ecologicamente attrezzate da destinare ad insediamenti produttivi non ne ha attenuato l'insostenibilità, sebbene tale normativa sia stata recepita da alcune Regioni. Ciò è dovuto sostanzialmente alla complessità anche scientifica della normativa ed alla sua scarsa integrazione, e perché invece, presupponeva livelli di semplificazione e capacità programatorie che le Regioni non sono sempre state in grado di raggiungere. Di conseguenza, si è continuato ad operare con il vecchio istituto dei Piani Attuativi Comunali, come i Piani per gli Insediamenti Produttivi (PIP), e delle aree industriali attrezzate a carattere sovracomunale, come i Piani delle aree e dei nuclei di sviluppo industriale (ASI) per fare fronte ad una permanente richiesta di aree industriali, con crescenti difficoltà a collocare le nuove imprese nel nord e in parte nel centro.

Si ottiene quindi che le ASI sono ritenute comunque insufficienti sull'intero territorio nazionale, e invece di spingere per la qualificazione dell'esistente, sia aree che singole imprese, si continua a supportare una richiesta "di edificazione di capannoni a bassa tecnologia ed alto impatto", mentre i costi di insediamento permangono alti, proprio nelle aree a più alta densità di impresa, come il nord-est [12].

## INNOVAZIONI ISTITUZIONALI

L'innovazione istituzionale è uno dei settori maggiormente rilevanti a livello internazionale e nazionale per la determinazione delle capacità e potenzialità di un paese. La sua importanza deriva sia dalla attuale accresciuta attività

normativa riguardante scambi economici e rapporti istituzionali, che dalle ineludibili ricadute gestionali delle normative nazionali sul sistema produttivo. La velocità e l'efficacia con cui un paese recepisce, ad esempio le norme del WTO piuttosto che della UE, ne determina la performance istituzionale; a queste problematiche internazionali si aggiungono naturalmente quelle interne proprie degli stati nazione, nei rapporti tra ruoli, compiti, funzioni e strutture delle pubbliche amministrazioni, centrali e locali [14].

Il concetto di innovazione istituzionale riguarda leggi nazionali, normative regionali e comunali, rapporto ricerca-industria-innovazione, supporto offerto dal quadro legislativo alla competitività delle imprese, norme di finanziamento, partecipazione a progetti su fondi strutturali, norme ambientali e quant'altro; ed a esso si collega la certificazione ambientale e la capacità di programmazione condivisa, come la governance.

La "governance" è diventata, in particolare negli ultimi quindici anni, uno degli elementi di confronto dei comportamenti istituzionali, scientifici e culturali. Oggi, difatti, si sente parlare sempre più di frequente di "cultura della governance", quella cultura che unisce i comportamenti e determina le regole del confronto fra le istituzioni, le imprese e le persone.

Questo processo, sicuramente endogeno per nascita e caratteristiche, ricorda, storicamente, l'altro grande processo di unificazione delle regole di comportamento verificatosi sul continente europeo, e poi diffusosi nei territori limitrofi, avvenuto con la diffusione della "cultura del diritto romano".

È naturalmente prematuro poter affermare che avrà gli stessi importantissimi effetti, ma persiste l'elemento fondamentale rappresentato dal fatto che di governance si discute nell'intero continente europeo, che esperti di tutta Europa si confrontano sulla sua base, che decisioni che riguardano lo sviluppo ed i bisogni dei cittadini sono prese in suo nome.

La definizione che viene riportata in [13] richiama il concetto di governance come quello che "designa le norme, i processi e i comportamenti che influiscono sul modo in cui le competenze sono esercitate a livello europeo, soprattutto con riferimento ai principi di apertura, partecipazione, responsabilità, efficacia e coerenza".

Così facendo la Commissione sembrerebbe aver voluto delineare quali sono i limiti nei quali opera la governance auspicabile, quella cioè che contribuisce più di ogni altra a promuovere, mediante la partecipazione, l'integrazione e la trasparenza, valori universali comuni nella società.

Inoltre, il concetto di innovazione istituzionale è direttamente collegata all'efficacia delle nuove leggi introdotte nel promuovere la competitività delle imprese. Infatti, ai fini della costruzione dell'Indice di Innovazione di un paese, vengono misurati numerosi indicatori, accettati a livello internazionale. L'indice innovativo finale è costituito a sua volta dalla media ponderata dei risultati relativi alle singole macro-aree. Con riferimento alla situazione italiana, appare opportuno citare una ricerca [15] inerente la complessità della pubblica amministrazione in Italia, estrapolandone alcuni elementi a contenuto ambientale.

Una difficoltà applicativa delle normative tecniche da parte delle imprese significa che esse stesse necessitano di supporto tecnico gestionale, che hanno costi interni aggiuntivi non sempre quantificabili e che quindi spesso si trovano a dovere rimandare scelte impiantistiche necessarie per l'incertezza nella gestione dei processi attuativi.

L'analisi sulla complessità della applicazione della

normativa ambientale, indica una situazione gestionale particolarmente difficile, nella quale elementi di confusione di merito si sovrappongono a contrasti di competenze tra istituzioni ed organi di controllo differenti, all'interno della quale spicca l'assenza della certificazione volontaria come elemento unificante e di semplificazione dell'approccio da parte delle imprese. Dal punto di vista gestionale ciò che rende difficoltoso/compleso l'iter procedimentale del settore ambiente è individuabile come indicato in Figura 3.

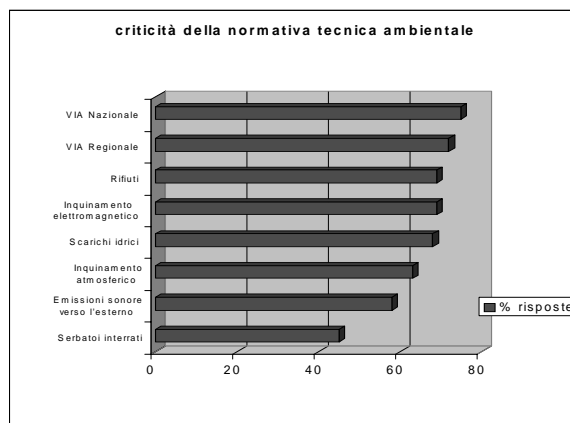


Figura 2: Criticità nell'applicazione della normativa ambientale [15]

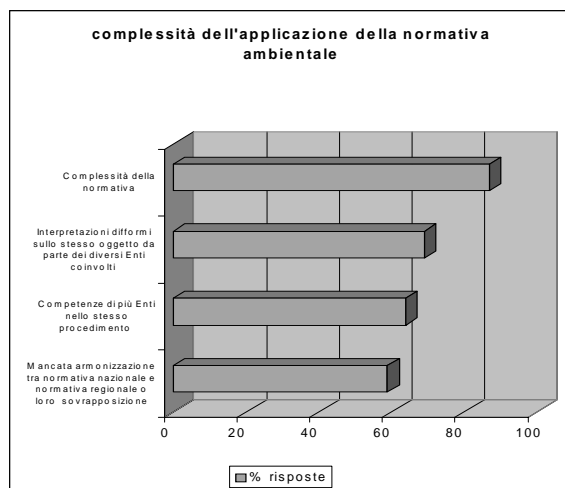


Figura 3: Complessità della normativa ambientale [15] (ENEA)

## IL PROGETTO LIFE-SIAM

I principali obiettivi del progetto Life-SIAM [1] sono: l'integrazione dei principi della sostenibilità nella localizzazione, nell'insediamento e nella gestione delle aree industriali; lo sviluppo di metodi innovativi, basati su di un approccio preventivo, per ridurre l'impatto ambientale e favorire lo sviluppo di tecnologie pulite in queste aree; la promozione del miglioramento continuo delle prestazioni ambientali, complessivamente delle intere aree industriali e, individualmente, delle singole imprese locali, con particolare riguardo a quelle di media e piccola dimensione; l'incoraggiamento allo sviluppo di un clima collaborativo e di efficaci rapporti tra le autorità locali, i cittadini e l'industria; la

## IL CASO DI STUDIO DI FROSINONE

creazione di condizioni favorevoli per incrementare l'occupazione, formare nuove figure professionali in grado di progettare e gestire le aree industriali. Questi obiettivi saranno perseguiti attraverso la definizione e l'applicazione di un Modello di Area Industriale Sostenibile, basato sull'uso, l'adattamento e l'integrazione di tre differenti strumenti comunitari di politica ambientale: la valutazione ambientale strategica (VAS), secondo la Direttiva 2001/42/CE [2]; l'EMAS secondo il Regolamento 761/2001/CE [3]; la Contabilità Ambientale ed il Libero Accesso all'Informazione sull'Ambiente, secondo la Direttiva 90/313/CEE [4].

Le attività, previste dal progetto a livello centrale (azioni riguardanti studi e ricerche, definizione di modelli, elaborazione di linee guida, ecc.) saranno svolte da un Comitato Tecnico (CT) che assisterà il Project Manager e coordinerà le attività dei Comitati Locali (CL) (azioni sperimentali). Ogni Comitato Locale farà riferimento ad un'area industriale e sarà costituito da rappresentanti della relativa autorità locale e/o dell'organizzazione che gestisce l'area e sarà assistito da un Forum Consultivo che comprenderà tutte le parti interessate. Nella fase iniziale del progetto, il CT condurrà uno studio preliminare sulle aree ecologicamente attrezzate e individuerà i relativi requisiti, quindi definirà un Modello di area industriale sostenibile comprendente i criteri di sostenibilità e le modalità di verifica.

Il modello sarà testato a livello locale dai CL che sono responsabili della conduzione della fase sperimentale del progetto e, sulla base dei risultati della sperimentazione, verrà prodotta una specifica Linea Guida. Per soddisfare l'esigenza di nuove figure professionali in grado di progettare e gestire un'area industriale in modo sostenibile, verranno organizzati e certificati appositi corsi. Tutti i risultati saranno ampiamente disseminati a livello nazionale e comunitario ed il Modello potrà essere successivamente testato in paesi in ingresso nella UE. Alcuni partner del progetto ed imprese locali intendono ottenere la registrazione EMAS, consentendo di assegnare evidenza pratica e solidità al progetto [1].

### Risultati attesi del Progetto LIFE-SIAM

Il progetto si propone di dare un contributo per integrare differenti strumenti comunitari (sia di tipo cogente che volontario) nella pianificazione e gestione territoriale. Inoltre è volto alla identificazione ed attuazione di un nuovo modo di applicare i principi dello sviluppo sostenibile, incoraggiando l'integrazione delle politiche ambientali, sociali ed economiche attraverso un processo che coinvolge insieme le autorità locali, l'industria ed il pubblico in generale [1].

Il questionario del progetto LIFE SIAM e le analisi del progetto attengono all'applicazione, attuazione ed integrazione della Governance territoriale, della VAS, di EMAS, della direttiva sull'informazione ambientale, di AG21 Locale.

I principali risultati attesi sono: i) analisi ambientale iniziale di otto aree industriali (task 4.1); ii) tre registrazioni EMAS di organizzazioni afferenti a tre distinte aree industriali (Comune di Molfetta, Conser Scrl, Marangoni Spa) (task 4.2); iii) attivazione di otto Forum locali (task 4.2); iv) validazione di otto Programmi Ambientali Territoriali di Area (4.2); v) redazione delle linee guida per l'applicazione del SIAM (task 5); vi) formazione di almeno trenta nuove figure professionali (progettista e gestore di Aree Industriali Sostenibili) (task 6).

Le aree del progetto sono: Padova, Rovigo, Frosinone, Mongrando, Prato, Cittaducale-Rieti, Maiella, Molfetta. Il progetto LIFE SIAM è svolto da 19 partners, tra cui l'ENEA e l'Università degli Studi di Cassino.

Nel contesto locale dell'area industriale Frusinate, non esistono ancora né importanti servizi ed infrastrutture ambientali (ad eccezione della gestione delle acque e dei rifiuti), né una gestione integrata dell'area ai fini della sostenibilità ambientale economica e sociale. In tale contesto, l'implementazione del Modello AIS previsto dal Progetto Life-SIAM può contribuire in maniera determinante a garantire un elevato grado di integrazione verticale ed orizzontale dei principi della sostenibilità e della governance nel territorio, a partire dalla localizzazione e gestione delle aree industriali. Il caso di studio proposto nel presente lavoro, analizza l'area industriale di Frosinone, sulla quale è stata sperimentata l'applicazione del Modello di Area Industriale Sostenibile.

Uno degli aspetti più importanti nell'ambito del Progetto Life-SIAM è l'analisi di sostenibilità dell'area industriale in esame, la quale, con riferimento al caso di studio, ha previsto le seguenti fasi: i) inquadramento territoriale e normativo ed identificazione del sistema locale dove ricadono gli effetti dell'AIS; ii) analisi dello stato di qualità delle matrici ambientali (e delle pressioni che agiscono su esse), nonché del tessuto economico e sociale; iii) individuazione degli aspetti di sostenibilità e la definizione di una metodologia per valutare la significatività degli aspetti (studio delle tendenze correlate allo sviluppo sostenibile); iv) valutazione degli aspetti di sostenibilità sulla base della metodologia definita mediante il monitoraggio e l'analisi degli impatti ambientali, economici e sociali di organizzazioni, strutture, edifici; v) rilevazione degli aspetti di sostenibilità ritenuti significativi nella percezione delle criticità ambientali, economiche e sociali.

### Il Comitato Locale

Al fine di consentire una migliore gestione delle varie fasi dell'analisi di sostenibilità dell'AIS di Frosinone e delle attività conseguenti, così come previsto dal Progetto Life-SIAM, è stato attivato un Comitato Locale (CL) costituito da rappresentanti di tutte le parti coinvolte: aziende dell'area, enti locali, associazioni di categoria, ecc. Per la costituzione del CL è stato necessario effettuare una mappatura delle parti interessate e valutare, per ciascuna fase di redazione/revisione dello studio, quali era indispensabile consultare. Sono state definite la metodologia per il coinvolgimento delle parti e le regole per la partecipazione al CL e per l'accesso alle informazioni e ai documenti prodotti. La consultazione è finalizzata alla condivisione di obiettivi e strumenti operativi, nonché all'attivazione di convenzioni/accordi, in particolare con gli enti locali competenti, per la miglior realizzazione delle azioni individuate. Essa riguarda, in sostanza, la costruzione dello scenario, i risultati dell'analisi, la definizione degli interventi e, infine, la condivisione del Piano di Miglioramento da adottare per il caso di studio.

La condivisione, in particolare con le aziende operanti nell'area, dei risultati dell'analisi è finalizzata innanzitutto a condividere le criticità emerse e a stabilire tra le stesse una gerarchia per la successiva definizione degli obiettivi da perseguire attraverso la pianificazione degli interventi. La condivisione ha anche lo scopo di individuare con le parti interessate i punti di forza (rispetto alla sostenibilità) dell'area e/o del contesto territoriale che dovranno essere valorizzati. Una volta partecipati i risultati dell'analisi, sono stati organizzati incontri con tecnici e consulenti delle aziende dell'area industriale al fine di individuare i fattori produttivi,

quindi gli approvvigionamenti, comuni, nonché le possibilità di attivare meccanismi di scambio e di riciclo di sotto-prodotti, materiale impiegato ed energia, in considerazione dei processi produttivi realizzati. Il risultato atteso è quello di mettere in atto meccanismi simbiotici tra impresa-impresa, impresa-gestore e impresa-territorio.

Per il CL sono state previste due figure istituzionali, elette di comune accordo con le parti interessate: il Soggetto Gestore dell'area industriale, la Provincia di Frosinone; e il Referente Tecnico, l'Università degli Studi di Cassino, in collaborazione anche con l'ASI di Frosinone e con il Palmer S.c.r.l. (Parco Scientifico del Lazio Meridionale) ed altre istituzioni locali, pubbliche e private, aziende, associazioni, ecc.

### La valutazione contingente dello stato ambientale

A supporto dell'analisi di sostenibilità dell'area industriale, è stata prevista la valutazione contingente sullo stato dell'ambiente in provincia di Frosinone. E' stato quindi sottoposto un questionario strutturato in modo da raccogliere opinioni e orientamenti comportamentali dei soggetti che gravitano nell'area industriale della provincia di Frosinone, con particolare riferimento al comprensorio industriale di Frosinone-Ferentino e del territorio limitrofo. L'obiettivo principale del questionario è stato quello di valutare le dimensioni delle problematiche economiche, sociali ed ambientali nella percezione della popolazione che opera nel comprensorio industriale. Per tale motivo, i soggetti ai quali è stato rivolto il questionario sono stati scelti tra quelli residenti, o comunque operanti, nell'area di Frosinone, e sono tutti componenti del sistema antropico costituente il sistema locale del lavoro di Frosinone.

Data la composizione sociale, culturale e produttiva del sistema locale del lavoro di riferimento, all'interno del quale grande importanza ha l'ASI Frosinone, il CL ha deciso che il campione scelto per la somministrazione del questionario fosse suddiviso in tre categorie: i) enti pubblici e privati (amministrazioni provinciali e comunali, associazioni di categoria) partecipanti ai Forum SIAM; ii) studenti universitari; iii) tecnici, industriali e cittadini.

Il campione composto da studenti presenta un'età compresa tra i 19 e 25 anni. Circa il 90% del campione di studenti considerato è costituito da iscritti al Corso di Laurea in Ingegneria dell'Ambiente e del Territorio dell'Università di Cassino del Polo di Frosinone, il restante 10% appartiene, invece, al Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica del polo di Cassino, ma residente comunque nel sistema locale contenente l'area industriale considerata. Il campione relativo agli studenti di formazione universitaria, in particolare, è risultato pari al 38% sul totale degli intervistati, quello relativo alle imprese al 49% e quello relativo alle PA al 13%. La ripartizione percentuale presenta una leggera supervalutazione del gruppo demografico compreso tra 25 e 30 anni, ma complessivamente mantiene una rappresentatività statisticamente valida delle varie direttrici di sviluppo del territorio: impresa, formazione qualificata, p.a. professionalmente innovativa.

Il campione rappresentativo delle aziende presenta un'età media dei rispondenti compresa principalmente tra i 21 e i 35 anni con una percentuale complessiva del 76%; una percentuale trascurabile (poco superiore all'1%) ha un'età inferiore ai 21 anni, mentre il restante ha un'età compresa tra i 36 e i 60 anni.

Per la Pubblica Amministrazione (PA), il campione rappresentativo dei rispondenti è compreso principalmente in

una fascia di età tra i 41 e i 50 anni, con una percentuale del 43%; la restante parte del campione è distribuita nelle altre fasce di età, con percentuali che oscillano tra il 4% e il 9%. I soggetti del campione di riferimento considerato sono dipendenti della PA del territorio della provincia di Frosinone.

I risultati ottenuti confermano una percezione diffusa di gravità in settori strategici quali: rifiuti, controlli ambientali, sicurezza, trasporti, aria. La priorità assoluta di intervento è attribuita alla problematica rifiuti, ed alla sua stretta connessione con i danni ambientali e paesaggistici sul territorio (presenza di ex discariche esaurite sul territorio, fenomeni di abusivismo edilizio, dissesto idrogeologico, ecc). Un posto decisamente rilevante nella scala di priorità delle criticità ambientali, è occupato dalla congestione delle arterie cittadine dovuta al traffico su strada e tutte le problematiche ad esso connesse, quali l'inquinamento atmosferico ed acustico e la carenza/inefficienza dei servizi pubblici adibiti al trasporto locale. L'importanza di tale dato è ancor più manifesta se si tiene conto che l'area industriale è collocata a ridosso di una delle più importanti direttrici autostradali e ferroviarie del paese, il cui sviluppo richiede ovviamente un efficiente sistema di trasporti locale, innestato su grandi reti transnazionali.

Dal punto di vista economico e sociale il territorio è ancora "visto" come multisettoriale, con una vocazione non totalmente industriale, ma con una triade di linee di sviluppo che devono coesistere, industriale, agricola e turistica. Questa percezione viene supportata da una richiesta di formazione qualificata e mirata, e dall'indicazione delle più rilevanti carenze territoriali: sanità, reddito, accessibilità all'informazione. In sostanza, emerge una visione poco integrata dell'area industriale, in cui si tende a rimandare ad altri soggetti, prevalentemente pubblici, le carenze sulla qualità di elementi. D'altro canto, decisamente significativa è la percezione dell'impatto economico di tali carenze nel bilancio familiare, ben superiore al 60% degli intervistati, che, pur se non quantificato, è sintomo di una diffusa preoccupazione sulla qualità di una parte dei servizi necessari.

Dal punto di vista della sostenibilità queste risposte spingono verso un maggiore controllo (e non una repressione) delle attività produttive prevedendo quindi una programmazione integrata dei servizi e delle infrastrutture, con interventi che rispondano contemporaneamente a più esigenze, tra cui si segnalano: rifiuti, qualità dell'aria, qualità dell'acqua, termovalorizzatori ed uso di fonti energetiche rinnovabili.

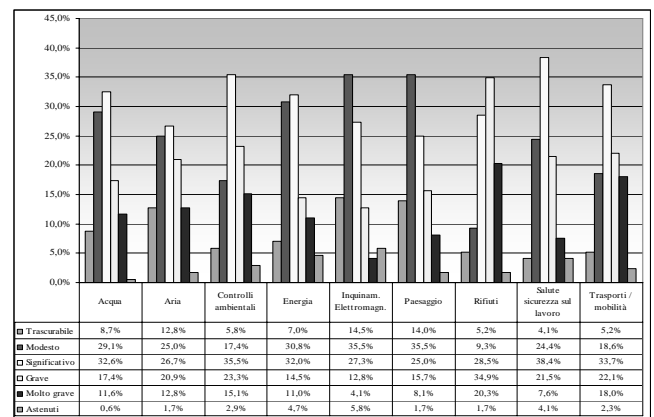


Figura 4: Aspetti critici della valutazione contingente dell'area industriale di Frosinone

Da qui la necessità dell'intervento pubblico come motore verso la sostenibilità d'impresa, e la presa d'atto dell'Amministrazione provinciale di Frosinone dell'importanza del progetto Siam quale primo passo verso una coscienza d'impresa innovativa, all'avanguardia, competitiva, responsabile e vincente.

### L'analisi di sostenibilità

L'analisi di sostenibilità riportata nel presente lavoro trae spunto dalle conclusioni riportate nella Valutazione Contingente sullo stato dell'ambiente.

Il primo passo è stato quello di definire l'inquadramento territoriale e l'identificazione del sistema locale dell'area in esame. Dal punto di vista territoriale non è facile affrontare problemi demografici che travalicano i confini provinciali, a causa dei liberi spostamenti di persone e di flussi economici.

La situazione della demografia in Provincia di Frosinone non è atipica rispetto a quella di molte altre province dell'Italia centrale, e sostanzialmente migliore del quadro demografico del Nord dove la natalità è scesa ulteriormente. Ciò non significa che, col progredire delle stesse tendenze statistiche e demografiche, non si creino grossi squilibri nei centri più piccoli (con una popolazione inferiore ai 2.000 abitanti) dove la composizione sociale e culturale del piccolo comune può cambiare drasticamente, sia per la mancanza di un ricambio generazionale, sia per il trasferimento di nuove componenti sociali da altri centri o dall'estero. Dal punto di vista territoriale non è facile affrontare problemi di demografia che travalicano i confini provinciali, a causa dei liberi spostamenti di persone e di flussi economici. Tra i dati più significativi qui riportati si citano: i) circa il 40% delle donne nubili tra i 20 ed i 30 anni disoccupate od inoccupate; ii) la proprietà dei beni immobili utilizzata come "forma di investimento" finanziarie (in tal modo si vanno a gonfiare a dismisura i prezzi delle case che - prima di essere forme di risparmio - sono beni indispensabili per vivere insieme); iii) l'assenza di un lavoro stabile e di un'abitazione idonea per le giovani coppie (ciò impedisce la creazione di nuovi nuclei familiari e rallenta la crescita, non solo personale, ma anche della collettività).

Per quanto concerne l'apparato industriale della provincia di Frosinone esso è caratterizzato dalla presenza di una forte diversificazione sia a livello dimensionale/ organizzativo che a livello settoriale. La forte articolazione settoriale fa emergere la mancanza di un settore guida per il comparto manifatturiero locale; infatti, a parte l'incidenza dell'edilizia e dell'industria metalmeccanica (automobilistica ed aeronautica), altri settori che raggiungono un discreto grado di significatività, sono quelli chimico-farmaceutico nell'area di Anagni e, quello relativo alle componenti elettriche ed elettroniche.

Le aziende sono prettamente orientate verso settori tradizionali e che impiegano una tecnologia matura come il cartotecnico, l'industria del mobile, l'estrazione e la lavorazione di minerali non metalliferi.

La struttura dimensionale/organizzativo è riconducibile a: i) 1° livello - grandi stabilimenti, nei quali il capitale e il management provengono da altri distretti industriali; ii) 2° livello - caratterizzato dalla presenza di poche imprese di media dimensione; iii) 3° livello - caratterizzato dalla presenza di p.m.i. dotate di una organizzazione di tipo elementare.

Le rilevazioni evidenziano come rispetto alla forte crescita industriale degli ultimi decenni non vi sia stata una altrettanto adeguata crescita relativa all'offerta dei servizi e di infrastrutture. La crescita urbana e la crescente inadeguatezza

delle condizioni insediative non hanno favorito un ricambio di natura qualitativa degli insediamenti industriali

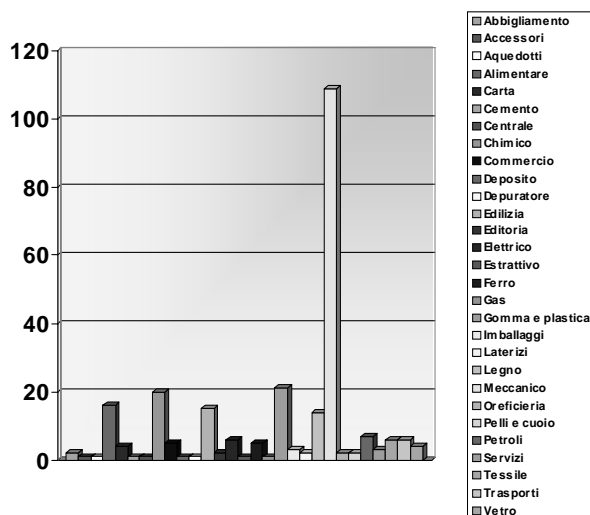


Figura 5: Distribuzione delle aziende, per tipologia, nell'area industriale di Frosinone

Per ciò che attiene alla localizzazione delle imprese, si evidenzia la presenza di sei aree di concentrazione industriale, comprensive di agglomerati ASI e di insediamenti esterni ad essi, previsti o meno dai PRG comunali: i) Anagni, Paliano e Sgurgola; ii) Alatri, Ferentino, Frosinone, Ceccano, Morolo, Patrica e Supino; iii) Arpino, Isola del Liri, Monte San Giovanni Campano e Sora; iv) Ceprano, Falvaterra e Pofi; v) Cassino, Piedimonte San Germano, Pontecorvo, Roccasecca, Villa Santa Lucia; vi) San Giorgio al Liri, Esperia e Coreno Ausonia.

Sulla base dei dati reperiti dal Consorzio ASI di Frosinone e dalla Provincia di Frosinone, è stato possibile effettuare l'analisi di sostenibilità relativamente all'utilizzo di risorse idriche, ai consumi di energia, alla produzione dei rifiuti e alla mobilità.

Per l' utilizzo di risorse idriche, sono stati analizzati i consumi delle aziende dell'ASI nonché i livelli qualitativi dei corpi idrici superficiali, con riferimento al D. Lgs. 152/99. Dall'analisi è emerso che il prelievo da falda come attingimento delle imprese è predominante rispetto all'utilizzo dell'acqua di rete. Infine l'indisponibilità di un dato disaggregato della quantità di acque in uscita dalle imprese non consente al momento alcuna analisi. Molto significativi sono i risultati sulla qualità delle acque, gran parte dei tratti dei corsi d'acqua esaminati hanno livelli d'inquinamento elevato. Si prospetta la necessità futura di consolidare il monitoraggio qualitativo delle acque tramite le tecniche di biomonitoraggio, in tal modo si renderanno più esplicite le cause dell'inquinamento e si potranno prendere decisioni con effetti mirati e risolutivi. Va segnalato che lo stato chimico è stato rilevato dagli enti preposti in poche sezioni ed attraverso un limitato numero di prelievi e pertanto risulta scarsamente rappresentativo dello stato di qualità dei corsi d'acqua. Bassi livelli di qualità dei macrodescrittori hanno indicato, quasi sempre, inquinamento dovuto ad elevati carichi organici biodegradabili dovuti alla presenza di centri urbani densamente popolati e serviti da un insufficiente sistema di collettamento e depurazione. Le notevoli difficoltà nel reperimento dei dati, suggeriscono la necessità di predisporre di un database elettronico aggiornato annualmente dei

consumi idrici delle imprese.

Lo studio effettuato sulla produzione quali-quantitativa dei rifiuti nell'Area Industriale risulta essere un primo approccio da sviluppare nelle successive analisi in modo puntuale e strutturato. Infatti è emersa la necessità di riuscire a disporre del quantitativo di rifiuto prodotto per tipologia di settore merceologico, in questo modo si andrebbero a visualizzare le criticità degli stessi così da predisporre in sede di pianificazione interventi mirati e diretti alle diverse specificità dei settori in questione. Partendo da questa classificazione si potrebbe seguire la vita del rifiuto per ogni settore merceologico in modo da individuare la parte destinata al normale smaltimento dalla parte recuperata, ed avere così una visione delle criticità e di conseguenza degli interventi da porre in atto. In questo modo si realizzerebbe quella spirale orientata al miglioramento continuo propria delle migliori politiche ambientali. Tutto ciò non è stato possibile in questa prima analisi ambientale; la classificazione è infatti esclusivamente riferita al rifiuto e non alla tipologia d'azienda produttrice del rifiuto. Per attuare la spirale del miglioramento sarà necessario nelle indagini future orientarsi verso questo ulteriore dettaglio di analisi.

Per quanto concerne il problema energia, dall'analisi dei dati emerge, comunque, che l'energia complessivamente prodotta nella Provincia di Frosinone, sia da impianti tradizionali che da impianti da fonti rinnovabili e assimilabili, sia veramente esigua. Relativamente ai consumi di energia elettrica si è evidenziato che la provincia di Frosinone con i suoi 2790 GWh è al secondo posto nella Regione con una percentuale di poco superiore al 13%, immediatamente dopo la capitale Roma, che da sola detiene il primato del 70% dei consumi regionali. I settori maggiormente energivori sono, nell'ordine, quello industriale, che con i suoi 1863 GWh rappresenta il 66% dei consumi provinciali, l'utenza domestica il 18%, il terziario il 15% e infine l'agricoltura meno dell'1%. Relativamente ai consumi di gas naturale (fonte Snam Rete Gas), si evidenzia la stretta correlazione esistente tra l'andamento dell'economia nazionale e gli stessi consumi.

Dall'analisi effettuata infine emerge che uno dei settori più critici è quello del traffico urbano, dove elevati livelli di congestione si rilevano durante le ore di punta (e.g. SS 156 Montilepini che collega il casello autostradale di Frosinone con la città stessa attraversando il polo industriale). La provincia di Frosinone ha posto in essere un programma di studio dettagliato sulla tematica conclusosi con la redazione del Piano del Traffico e della Viabilità Extraurbana. Per quanto riguarda il traffico ferroviario, l'incidenza sul trasporto provinciale è minima; mentre il sistema di pubblico trasporto è poco dedicato al servizio dell'Area Industriale.

## CONCLUSIONI

La redazione del Piano di Miglioramento è finalizzata alla definizione e programmazione delle azioni che le aziende operanti nell'area industriale dovranno attivare per la riduzione del degrado ambientale prodotto, quindi per il miglioramento sostenibile. Tale finalità sarà perseguita attraverso l'attivazione di un processo di pianificazione strategica finalizzato ad individuare in maniera specifica modalità, tempi e responsabilità per la realizzazione delle azioni, sia che consistano in interventi di collaborazione e di scambio tra le aziende e con le parti sociali coinvolte nelle attività, sia che incidano sui processi produttivi e di gestione per renderli più ecoefficienti. Le azioni saranno quindi

individuare e programmate in maniera concertata tra le parti coinvolte (nel CL); ciò per far sì che l'unicità d'intenti e la condivisione di problematiche/responsabilità tra pubblico e privato agevoli il percorso verso il miglioramento e soprattutto contribuisca a garantirne la connotazione "sostenibile". Il risultato del processo di pianificazione sarà la costruzione di uno "scenario per la sostenibilità", che individuerà le caratteristiche, la conformazione cui l'area industriale dovrà tendere nei prossimi anni per una corretta e consapevole gestione di risorse essenziali al suo funzionamento.

Partendo dai risultati emersi dall'analisi di sostenibilità dell'Area Industriale e dalla valutazione contingente, si dovrà indagare il ruolo di ciascuna azienda nell'ambito delle criticità ambientali emerse dall'analisi, nonché gli ambiti di miglioramento. L'indagine potrà eventualmente avvalersi di strumenti specifici per misurare input ed output di risorse. L'analisi sarà integrata dall'individuazione delle potenziali "simbiosi" tra aziende diverse, nonché delle economie (sia di costi sia di consumo di risorse) derivanti dalla gestione unica dell'area industriale.

Sulla base dei risultati dell'analisi di sostenibilità sarà elaborata un'analisi SWOT al fine di rendere leggibili in maniera immediata le criticità e i punti di forza emersi. Si procederà poi ad effettuare indagini integrative dell'analisi del contesto che consentano di evidenziare, laddove presenti, le caratteristiche di aziende particolarmente "impattanti" sul territorio ed evidenziarne le relazioni con le altre aziende dell'area; allo stesso modo dovrà emergere dall'analisi la presenza di aziende che, per le caratteristiche produttive o per la tipologia di prodotto, presentano una forte integrazione territoriale (es. prodotti con marchio IGP, legati all'immagine del territorio o alla cultura e alla storia locale). L'analisi dovrà anche evidenziare lo stato dell'area industriale rispetto ad obiettivi ed azioni proposte da Piani e Strategie europee e italiani per lo sviluppo sostenibile; a tale scopo potrà essere elaborata un'apposita scheda di verifica.

I principi generali e le linee di intervento su cui impostare il miglioramento degli aspetti ambientali sul territorio, sono: i) favorire la prevenzione dell'inquinamento ed il continuo miglioramento delle prestazioni ambientali sul territorio; ii) favorire l'applicazione di strumenti di monitoraggio per la conoscenza sistematica delle caratteristiche qualitative del territorio e per la verifica dell'andamento degli indicatori di prestazione definiti; iii) consentire il mantenimento della conformità normativa per gli adempimenti di pertinenza delle aziende del distretto e degli Enti locali; iv) definire modelli gestionali innovativi per lo sviluppo dei sistemi di gestione ambientale anche al fine di incentivare l'adesione al Regolamento CE n. 761/2001 ("EMAS"); v) diffondere le informazioni utili alla conoscenza degli strumenti volontari di gestione ambientale, comprese le politiche di prodotto; vi) attivare e mantenere attivo un processo di comunicazione sulle tematiche ambientali con i vari interlocutori presenti sul territorio, per diffondere la cultura ambientale ed i principi contenuti nella presente Politica ambientale; vii) promuovere attività di informazione e formazione alle organizzazioni pubbliche e private del distretto, per sviluppare le competenze professionali adeguate, utili ad una migliore gestione delle questioni ambientali.

## BIBLIOGRAFIA

1. Il Progetto SIAM (n. LIFE04 ENV/IT/000524). [disponibile su: <http://www.siamproject.it>].

2. O. Chitotti, A. Minidio, *Valutazione ambientale strategica ANCI, CRESME - Relazione sullo stato degli enti locali*, 2005.
3. EMAS Regolamento 761/2001/CE.
4. Direttiva 2003/4/CE Informazione ambientale: in materia di accesso ai documenti ambientali.
5. Fondazione Lombardia per l'Ambiente, *Guida europea all'Agenda 21 Locale*, Milano, 1999.
6. A. Cimino, *Le problematiche ambientali nel distretto industriale conciario di santa croce sull'arno*, Valutazioni Ambientali, Dicembre 2004.
7. A. Forni, A. Cimino, I. Olivetti, A. Orasi, I. Salzano, F. Scipioni, R Squillace, *Progetto PR7/E danno ambientale Allegato 1 Caso di studio: il distretto conciario di Solfora*, Ministero Ambiente e ENEA, 2004.
8. A. Forni, et al, *Indagine sulla percezione dei rischi ambientali e sanitari nel territorio dell'az. usl 11 – zona del Valdarno inferiore*, Salute e Territorio, Regione Toscana, 2004.
9. ISO 14001:2004 - Environmental management systems - Requirements with guidance for use.
10. *Posizione del Comitato per l'Ecolabel e per l'Ecoaudit sull'applicazione del Regolamento EMAS sviluppato in ambiti produttivi omogenei*, Sezione EMAS del Comitato per l'Ecolabel e per l'Ecoaudit, 28/01/2005.
11. VAS - Direttiva Europea 2001/42/CE
12. A. Forni et al., *Problematiche dell'integrazione degli strumenti di politica ambientale: VAS e EMAS*, ENEA, 2006.
13. Commissione Europea, *La governance europea: un libro bianco*, Bruxelles, 2001 (disponibile su: [http://europa.eu.int/comm/governance/index\\_fr.htm](http://europa.eu.int/comm/governance/index_fr.htm)).
14. CNR, 2° RAPPORTO "INNOVAZIONE DI SISTEMA" *Analisi comparata del potenziale innovativo dei principali paesi industrializzati*, 2002.
15. Formez - Confindustria, *La pubblica amministrazione e l'associazione di imprese Progetto SIMPLICITER*, 2003.



## CRITERI PER L'OTTIMIZZAZIONE DEL PIANO ENERGETICO REGIONALE CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALLA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI CO<sub>2</sub>

Paola Girdinio<sup>1</sup>, Emmanuele Martino, Alessandro Pini Prato<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DIE – Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Genova, indirizzo A(?), <sup>2</sup>DIMSET – Dipartimento di Macchine, Sistemi Energetici e Trasporti, Università di Genova indirizzo B

### SOMMARIO

L'articolo verte sui contenuti di una tesi di laurea svolta da Emmanuele Martino, avente come relatori la professoressa Paola Girdinio ed il professor Alessandro Pini Prato, nella quale si è cercato di affrontare le problematiche inerenti la pianificazione energetica a livello regionale, con particolare riferimento all'individuazione di una metodica focalizzata sulla ricerca di quelle disposizioni attuative che fossero in grado di far conseguire la maggior diminuzione possibile delle emissioni di anidride carbonica. Anche alla luce della mancanza di regole precise riguardo la stesura dei piani energetici, è sembrato utile cimentarsi nell'ideazione di uno standard per la loro compilazione, in modo da ottenere una maggiore omogeneità nei contenuti, e quindi nei risultati, tra i documenti di pianificazione delle varie regioni italiane, oltre ad una più semplice integrazione degli stessi in un quadro comune. Per poter riuscire a sperimentare la metodica di pianificazione elaborata è stato preso in esame il Piano Energetico Ambientale Regionale della Liguria (PEARL), in vigore fino al 2010, del quale si è effettuata un'implementazione, in qualità di esempio applicativo, finalizzata al suggerimento di strategie per un possibile miglioramento in corso d'opera.

### INTRODUZIONE

In ottemperanza all'articolo 5 della legge 9/1/1991 n. 10 le Regioni avrebbero dovuto dotarsi di un "Piano Energetico Regionale", principale strumento attraverso cui programmare ed indirizzare gli interventi strutturali in campo energetico, armonizzando le decisioni rilevanti assunte a livello locale. Dal 2002 questo documento ha inoltre acquisito la valenza di "Ambientale", in virtù del cambiamento di impostazione, ora maggiormente indirizzato verso le nuove tematiche apertesi con le politiche post Protocollo di Kyoto. Artefici di tale mutamento di impostazione sono stati gli impegni assunti nell'ambito della "Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province Autonome", che prevedevano infatti, tra l'altro, l'elaborazione entro l'anno 2002 di Piani Energetici Ambientali Regionali (PEAR) fortemente improntati alle problematiche inerenti i gas ad effetto serra e l'individuazione, nell'ambito dei Piani di Risanamento e Tutela della Qualità dell'Aria (PRTQA), di strategie ottimali per la riduzione dei sopraccitati gas serra. Questi ultimi, infatti, come emerso dalla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UN-FCCC) approvata a New York il 9 maggio del 1992, sono riconosciuti come la causa principale dei cambiamenti climatici sul nostro pianeta: è quindi comprensibile la richiesta di formulare pianificazioni, a livello nazionale come regionale, che li tengano in debito conto. Questo anche perchè, a seguito della ratifica da parte dell'Italia del Protocollo di Kyoto, lo strumento elaborato dalla "Conferenza della Parti" (organo istituito dalla Convenzione) tramite il quale i principi e gli impegni contenuti nella Convenzione stessa trovano attuazione, il conseguimento di precise diminuzioni delle emissioni antropogeniche di gas capaci di alterare l'effetto serra naturale del nostro pianeta diviene vincolante.

Più specificatamente, l'Italia dovrà ridurre, entro il 2012, le proprie emissioni antropogeniche di gas capaci di alterare l'effetto serra naturale del nostro pianeta nella misura del 6,5% rispetto ai livelli del 1990 (555 milioni di tonnellate). L'effettivo conseguimento di questo obiettivo risulta inevitabilmente dipendente, non solo dalla bontà delle strategie di carattere generale impiegate, ma soprattutto dalla metodologia adoperata per caratterizzare quegli interventi operativi che meglio si prestano alla realizzazione dello stesso. L'adozione, su base regionale, di piani rivolti alla programmazione energetico-ambientale ed al risanamento ed alla tutela della qualità dell'aria può rivelarsi quindi realmente impattante sulle problematiche inerenti le emissioni di gas serra solo nella misura con la quale questi ultimi riescano ad ottimizzare l'effetto dei provvedimenti messi in atto. Appare evidente, infatti, come ogni possibile intervento proposto per l'adempimento degli impegni assunti con la ratifica del protocollo di Kyoto, sia caratterizzato da livelli intrinseci di praticabilità e penetrabilità nei differenti territori regionali, oltre che da differenti rapporti tra l'effetto ricavato ed il costo sostenuto per ottenerlo. Solo con una combinazione, correttamente individuata, di questi interventi è possibile raggiungere i migliori risultati conseguibili in termini di efficacia complessiva degli interventi per singola allocazione di risorsa finanziaria.

### 1. METODOLOGIA DI PIANIFICAZIONE

In Figura 1 è mostrata la schematizzazione di un generico percorso di conversione dell'energia, caratterizzato da tre stadi principali, ovvero le fonti, le catene energetiche e gli usi.



Figura 1.a : Schematizzazione del percorso di conversione dell'energia

La metodica di pianificazione proposta parte proprio da questa macro suddivisione dei possibili “ambiti energetici” per poi poggiare le sue basi sull’ottimizzazione dell’allocazione delle risorse economiche pubbliche, in modo tale da accordare a ciascun intervento ipotizzabile nei macro-settori precedentemente individuati una quota parte delle risorse finanziarie totali tale da massimizzare il beneficio derivante dalla somma di tutti gli interventi. Effettuando infatti dettagliate valutazioni di tipo tecnico sulle azioni e strategie intraprendibili (circa la penetrabilità nel territorio, l’effetto utile, l’esborso finanziario, la tempistica) ed elaborandole mediante opportuni algoritmi di ottimizzazione, si può ottenere la quantità di anidride carbonica che è tecnicamente ed economicamente possibile non immettere in atmosfera. Il criterio di ottimizzazione utilizzato consiste in pratica nel ricercare la condizione di suddivisione del budget a disposizione per la quale il sovracosto marginale, ovvero l’investimento incrementale, abbia lo stesso effetto di riduzione delle emissioni su ogni linea di intervento.

A livello prettamente operativo la procedura di compilazione dei documenti di pianificazione può essere suddivisa nelle tre seguenti distinte parti:

1. Definizione dello scenario al “tempo 0”
2. Informazioni per la definizione dello scenario
3. Elaborazione dello scenario

I primi due punti, che definiscono la configurazione energetica pregressa nella quale si andrà ad intervenire, risultano ovviamente propedeutici alla realizzazione del terzo, vero e proprio fulcro del meccanismo di pianificazione. Di seguito questi tre punti, anche vista la loro importanza cruciale, sono analizzati con maggiore dettaglio.

### 1.1 Definizione dello scenario al “tempo 0”

Questa fase serve per inquadrare il sistema energetico in esame, in modo da ottenere una fotografia esaustiva dello scenario energetico pregresso. Schematicamente può essere ricondotta a tre punti principali:

1. Definizione degli ambiti territoriali e dei vincoli sulle tipologie di intervento (“volume di controllo”)
2. Il Bilancio energetico relativo alla realtà locale in esame
  - analisi delle utenze industriali e civili*
  - analisi del “mix” di fonti primarie utilizzate*
  - interconnessioni con il sistema energetico nazionale*
3. Le catene energetiche utilizzate
  - limiti di efficienza*
  - analisi dei rendimenti dei sistemi di conversione*

Il primo punto è necessario per definire in maniera chiara quale sia il “volume di controllo”, ovvero l’insieme degli ambiti che si intende considerare. Ad esempio, nel caso proposto relativo alla regione Liguria, non si sono tenute in esame interventi inerenti le catene non stazionarie, ovvero legate al comparto dei trasporti, o relativi ai grandi impianti di generazione elettrica presenti sul territorio ligure, in quanto non direttamente controllabili dall’amministrazione regionale. Il passo successivo è quello di analizzare la serie storica dei

bilanci energetici regionali, al fine di conoscere non solo l’attuale ripartizione dei flussi energetici regionali, ma anche il loro andamenti temporale. E’ poi inoltre necessario evidenziare tutte le maggiori infrastrutture a carattere energetico presenti sul territorio (reti di trasmissione dell’energia elettrica, gasdotti, oleodotti, centrali di generazione elettrica). Così facendo si è in grado di ottenere una dettagliata caratterizzazione energetica su più livelli della realtà in esame, che deve poi essere analizzata criticamente (punto 3) per evidenziarne i limiti di efficienza e le problematiche strutturali.

### 1.2 Informazioni per la definizione dello scenario

In questa seconda fase è invece necessario raccogliere le informazioni indispensabili per la formulazione dello scenario di pianificazione. Anche in questo caso l’analisi può essere ridotta schematicamente a tre punti essenziali:

1. Inventario degli interventi pianificabili
  - fonti energetiche*
  - catene di conversione*
  - usi finali dell’energia*
2. Analisi dei potenziali esistenti relativi a tali interventi
  - limiti e criteri di applicabilità alle realtà locali*
3. Analisi dei costi specifici per ogni tecnologia
  - costi fissi e variabili*
  - sovracosti*
  - costi indiretti (informazione, divulgazione)*
  - trend dei costi all’aumentare della penetrazione di ogni tecnologia*

L’inventario degli interventi pianificabili (punto 1) è di cruciale importanza. E’ infatti necessario stabilire quali tipologie di intervento (ad esempio relative a tecnologie solari, eoliche, cogenerative, di pompaggio di calore, di isolamento termico...) è possibile effettuare nel contesto regionale. Il passo successivo è quello di valutare, per ogni intervento ipotizzato pianificabile, il potenziale energetico massimo sostituibile ed il sovracosto specifico. E’ importante notare come la valutazione del potenziale massimo, ad esempio per le fonti rinnovabili, debba essere ponderata con le reali disponibilità areali di risorse: non appare pensabile, infatti, la definizione di un potenziale regionale slegato dall’applicabilità alle realtà locali. Per quel che riguarda l’aspetto economico legato alle tecnologie, la metodologia proposta cerca di tenere in debito conto anche tutte quelle componenti di costi, generalmente “nascosti”, che si incontrano utilizzando nuove tecnologie o cercando di coinvolgere una sempre più crescente parte della popolazione a mutare le proprie abitudini nella fruizione di un servizio, in questo caso lo sfruttamento di risorse energetiche. Per fare ciò sono stati introdotti dei “sovracosti” con la funzione di quantificare gli oneri finanziari legati, ad esempio, alle campagne pubblicitarie in favore dell’efficienza energetica, agli incentivi in caso di installazione di dispositivi ad energia rinnovabile, all’organizzazione di seminari e conferenze ed in generale a tutto ciò che possa contribuire al passaggio ad una configurazione energetica caratterizzata da una minor emissione di anidride carbonica.

### 1.3 Elaborazione dello scenario

Procedendo nella definizione dello scenario di pianificazione si è provato ad effettuare l’elaborazione di una procedura operativa che consentisse di effettuare la ripartizione delle risorse finanziarie secondo procedure

standard tali da evitare scelte aprioristiche. Inoltre, si è cercato di caratterizzare tale procedura in modo che risultasse coerente con gli sforzi circa la riduzione delle emissioni di anidride carbonica derivanti dagli scenari aperti dopo la ratifica del trattato di Kyoto. L'unione di queste due condizioni, indispensabili per procedere nella stesura di un piano energetico immune da spinte irrazionali e che possa inoltre fregiarsi del titolo di "ambientale", si può quindi tradurre nella ricerca di una procedura in grado di ricavare quale sia, tra la tante possibili, quella allocazione delle limitate risorse finanziarie disponibili fra la pletora di interventi individuati, che massimizzi la diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Tale procedura si presta ad essere approcciata come problema di ottimo vincolato, risolvibile tramite la teoria matematica dei moltiplicatori di Lagrange, di seguito brevemente esposta.

Siano infatti:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(x_1, \dots, x_n) & \text{funzione che si desidera ottimizzare} & (1) \\ \mathbf{g}(x_1, \dots, x_n) & \text{funzione di vincolo} & (2) \end{aligned}$$

entrambe continue nell'insieme I delle soluzioni di g. Si definisce:

$$\mathbf{L}(x_1, \dots, x_n, \lambda) = \mathbf{f} - \lambda \mathbf{g} = \text{Lagrangiano} \quad (3)$$

(con  $\lambda$  = moltiplicatore di Lagrange)

Il problema trova soluzione risolvendo il sistema:

$$\begin{cases} \partial \mathbf{L} / \partial x_i = \partial \mathbf{f} / \partial x_i - \lambda (\partial \mathbf{g} / \partial x_i) = 0 \\ \mathbf{g} = 0 \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, n \quad (4)$$

Il sistema (4) è composto da (n+1) equazioni formalizzate mediante (n+1) incognite, cioè le  $x_i$  e  $\lambda$ . La sua risoluzione fornisce i valori delle  $x_i$  e di  $\lambda$  tali da massimizzare (o minimizzare)  $\mathbf{L}$  in modo che il vincolo sia rispettato.

Qualora la funzione di vincolo  $\mathbf{g}$  fosse espressa da una semplice combinazione lineare delle  $x_i$ , il sistema (4) approda alla seguente più semplice formulazione:

$$\begin{cases} \partial \mathbf{L} / \partial x_i = \partial \mathbf{f} / \partial x_i - \lambda = 0 \\ \mathbf{g} = 0 \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, n \quad (5)$$

In questo caso la soluzione cui si giunge ha l'ulteriore significato di comprendere i valori delle  $x_n$  che non solo non violano il vincolo  $\mathbf{g}$ , ma che contemporaneamente accordano il medesimo valore  $\lambda$  a tutte le i-esime derivate parziali di  $\mathbf{f}$ . Tale caso è quello utilizzato nell'elaborazione della procedura di ripartizione delle risorse finanziarie proposta in questa sede. E' infatti possibile ottenere la formalizzazione del processo di pianificazione intermini di problema di ottimo vincolato nel seguente modo.

Stabiliti il numero  $n$  dei provvedimenti attuabili e l'ammontare complessivo  $\mathbf{C}$  di risorse finanziarie disponibili, si definisce, per ogni i-esimo intervento, la funzione  $\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i)$  che lega il valore della risorsa economica  $\mathbf{C}_i$  accordata al provvedimento con la quantità di anidride carbonica che è possibile non immettere in atmosfera proprio in seguito al suddetto provvedimento.

La funzione  $\mathbf{f}$  da massimizzare risulta essere quindi la quantità totale di anidride carbonica non immessa in

atmosfera, ovvero la somma delle singole riduzioni  $\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i)$  imputabili alla messa in opera degli  $n$  provvedimenti. Sarà quindi:

$$\mathbf{f} = \sum \text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i) \quad \text{con } i = 1, \dots, n \quad (6)$$

La funzione  $\mathbf{g}$  di vincolo, invece, esplicita l'ovvia condizione che la somma degli  $n$  contributi  $\mathbf{C}_i$  allocati agli  $n$  interventi risulti pari al budget  $\mathbf{C}$  disponibile per la pianificazione energetica. Quindi:

$$\mathbf{g} = \sum \mathbf{C}_i - \mathbf{C} \quad \text{con } i = 1, \dots, n \quad (7)$$

Il Lagrangiano avrà quindi la seguente formulazione:

$$\mathbf{L} = \mathbf{f} - \lambda \mathbf{g} = \sum \text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i) - \lambda (\sum \mathbf{C}_i - \mathbf{C}) \quad (8)$$

con  $i = 1, \dots, n$

Il sistema risolvente è quindi del tipo:

$$\begin{cases} \partial \mathbf{L} / \partial \mathbf{C}_i = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{C}_i - \lambda = 0 \\ \mathbf{g} = \sum \mathbf{C}_i - \mathbf{C} = 0 \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, n; \quad (9a)$$

$$\begin{cases} \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{C}_i = \lambda \\ \sum \mathbf{C}_i = \mathbf{C} \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, n \quad (9b)$$

Come evidenziato dalla dicitura  $\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i)$ , la diminuzione di immissioni di anidride carbonica riconducibile ad un generico i-esimo intervento è ovviamente legata, tramite parametri, *esclusivamente* al corrispondente valore  $\mathbf{C}_i$  di risorsa finanziaria accordata all'intervento stesso. Gli  $n$  termini ( $\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{C}_i$ ), derivate *parziali* di  $\mathbf{f}$  rispetto alle  $n$  variabili  $\mathbf{C}_i$ , risulteranno quindi rispettivamente pari alle  $n$  derivate *totali*  $\{[d\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i)]/d\mathbf{C}_i\}$ .

Il sistema (9b) assume quindi la seguente forma:

$$\begin{cases} \{[d\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i)]/d\mathbf{C}_i\} = \lambda \\ \sum \mathbf{C}_i = \mathbf{C} \end{cases} \quad \text{con } i = 1, \dots, n \quad (9c)$$

Tramite questa formulazione si evidenzia in maniera molto chiara quale sia la logica sottesa a questo tipo di pianificazione: imponendo che le derivate delle  $n$  funzioni  $\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i)$  abbiano lo stesso valore  $\lambda$ , si ottimizza infatti la ripartizione dei finanziamenti perché si accorda ad ogni provvedimento una quota parte delle risorse finanziarie disponibili tale da consentire ad ogni intervento di esprimere il *medesimo vantaggio incrementale*.

Per ogni intervento si è ipotizzato una funzione  $\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i)$  di tipo esponenziale, l'andamento indicativo della quale è rappresentato in figura 1.3.a, e cioè della forma:

$$\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i) = \mathbf{A}_i [1 - e^{-(\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i)}] \quad (10)$$

con  $\mathbf{A}_i$  e  $\mathbf{B}_i$  parametri caratteristici di ogni singola linea d'intervento

La formulazione della derivata della funzione  $\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i)$ , necessaria per risolvere il sistema di equazioni precedentemente menzionato, ha la seguente forma, naturalmente sempre esponenziale:

$$[d\text{CO}_{2i}(\mathbf{C}_i)/d\mathbf{C}_i] = \mathbf{A}_i \mathbf{B}_i [e^{-(\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i)}] \quad (11)$$

L'andamento indicativo di tale funzione è mostrato in figura 1.3.b.

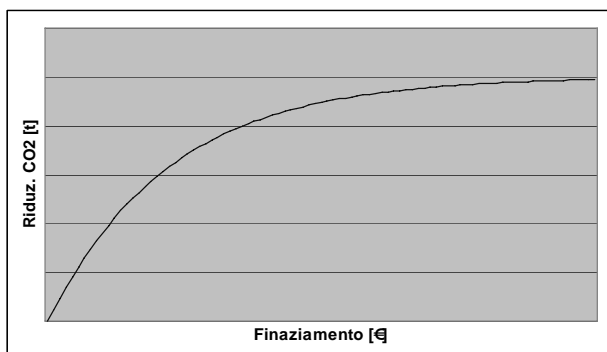


Figura 1.3.a: Andamento indicativo dell'i-esima funzione  $CO_{2i}(C_i)$

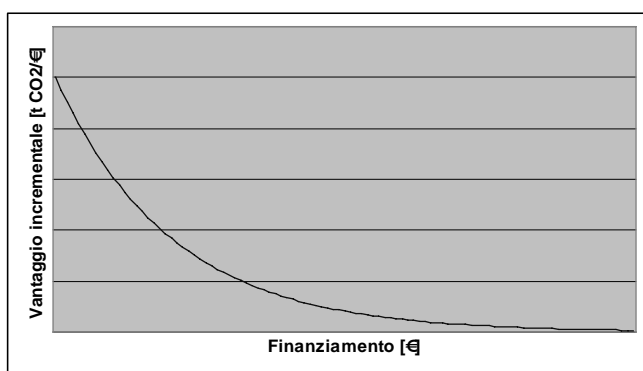


Figura 1.3.b: Andamento indicativo dell'i-esima funzione  $[dCO_{2i}(C_i)/dC_i]$

La determinazione dei parametri  $A_i$  e  $B_i$  proviene da altri tre parametri, veri e propri “dati d’ingresso”, che rappresentano le informazioni circa lo specifico potenziale di energia sostituibile nella regione di interesse, il beneficio ambientale ottenibile ed il sovracosto necessario per ottenerlo. Questi parametri sono:

- $a_i$  = potenziale energetico sostituibile con la i-esima tecnologia [GWh]
- $b_i$  = sovracosto unitario di conversione per l’i-esima tecnologia [€/GWh]
- $c_i$  = riduzione di  $CO_2$  per unità di energia sostituita per l’i-esima tecnologia [t/GWh]

Come si può notare, questi dati sono elencati secondo un criterio di “controllabilità decrescente”. Infatti, fissato l’i-esimo intervento, praticamente solo il parametro  $a_i$  è fortemente variabile in funzione della morfologia regionale. Il parametro  $b_i$ , invece, è solo minimamente dipendente dalla regione in esame. Il parametro  $c_i$ , infine, è funzione solamente della tecnologia adottata.

Come detto, combinando opportunamente questi dati si ottengono i parametri  $A_i$  e  $B_i$ :

- $A_i$  = potenziale di riduzione di  $CO_2$  per l’i-esima tecnologia =  $a_i c_i$  [t]
- $B_i$  = costante di sovracosto di conversione per l’i-esima tecnologia =  $1/(a_i b_i)$  [1/€]

E’ inoltre interessante notare, come si evince dalla figura 1.3.b, che le funzioni derivata siano caratterizzate da un andamento decrescente: questo significa che, man mano che

aumenta la penetrazione della tecnologia, minore è il vantaggio specifico che è possibile ottenere (allocare risorse su questi interventi diventa cioè meno fruttuoso).

L’andamento mostrato nelle figure 1.3.a e 1.3.b evidenzia inoltre come la scelta di modellizzare l’andamento della riduzione delle emissioni di anidride carbonica dovuta all’i-esimo intervento in funzione della relativa risorsa economica accordata secondo un legame di tipo esponenziale provenga essenzialmente da due ordini di valutazioni:

- In prima istanza, tale andamento si presta in maniera ottima ad esplicitare con forza il concetto che la penetrazione di una nuova tecnologia nella società, e quindi il beneficio che dall’adozione di essa se ne può ricavare, risulti progressivamente sempre più oneroso man mano ci si avvicini al potenziale massimo raggiungibile
- Secondariamente, permette di utilizzare in maniera semplice ed intuitiva i dati in possesso, schematizzati nei due parametri  $A_i$  e  $B_i$ , oltre al valore  $C$  del budget disponibile

E’ comunque bene ricordare che l’utilizzo di tale funzione per modellizzare l’andamento della riduzione delle emissioni di anidride carbonica è basata, come spesso accade, esclusivamente su di un’ipotesi di lavoro. Di certo non del tutto infondata, anzi come si è visto risponde a due esigenze di *coerenza e semplicità di sistema* non trascurabili, ma lungi dal voler porsi come una rappresentazione esaustiva del complesso legame sussistente tra le risorse economiche allocate e l’effettiva diminuzione di anidride carbonica immessa. I risultati ottenuti impiegando questo tipo di procedura non vanno quindi intesi come dati incontrovertibili ed immuni all’errore, ma hanno bensì la presunzione di porsi come un buon punto di partenza per la redazione di un PEAR che cerchi di inquadrare, e successivamente valutare, in maniera obiettiva le potenzialità energetiche del territorio sede della pianificazione in oggetto.

L’applicazione della metodologia proposta appare vantaggiosa anche alla luce di alcune ulteriori considerazioni. Ricordando infatti l’andamento qualitativo delle curve di penetrabilità del territorio da parte degli interventi, ci si accorge di come, a parità di energia sostituita, ogni incremento successivo risulti sempre maggiormente oneroso rispetto al precedente. Quindi, una distribuzione iniziale di finanziamenti fortemente sbilanciata verso alcuni interventi, non significa affatto l’accantonamento dei restanti, in quanto quest’ultimi vedranno nelle successive pianificazioni aumentare la propria percentuale di finanziamento. Ciò è possibile in virtù del fatto che gli interventi inizialmente assegnatari di un maggior contributo economico, vedendo aumentare più velocemente la parte di territorio da loro penetrata, riducono nel contempo le potenzialità delle loro performance future, a vantaggio dei provvedimenti precedentemente penalizzati.

## CENNI SULL’ALGORITMO DI OTTIMIZZAZIONE

L’algoritmo che permette di effettuare l’ottimizzazione del piano finanziario è stato sviluppato tramite la compilazione di alcuni fogli di Excel, tutti raggruppati in un unico file. Tale file, di dimensioni poco superiori ai 2 MB, consente di ottenere una soluzione in poco meno di 10 secondi per allocazioni di finanziamenti fino a 13 tecnologie. La struttura completamente “aperta” (i procedimenti computazionali sono visibili e modificabili) consente comunque, se necessario, di implementare il procedimento per un numero maggiore di

tecnologie. Non è automatizzato al 100%, infatti alcuni brevi e semplici passaggi necessitano l'intervento umano. Ciò comunque consente di completare tutte le procedure di calcolo, se si dispone di dati già formalizzati secondo le specifiche dell'algoritmo, in meno di 5 minuti. E' inoltre possibile ottenere, dopo qualche passaggio manuale, una visualizzazione grafica del confronto tra diversi scenari di finanziamento ipotizzati dall'utente, oltre ai grafici relativi allo scenario di riferimento selezionato dall'utente.

Il file è strutturato in maniera molto semplice ed intuitiva, ed è composto essenzialmente dalle seguenti quattro sezioni:

1. Il foglio "Intro"
2. Il foglio "Budget"
3. I fogli "# tecn."
4. I fogli per la visualizzazione grafica dei risultati

Il primo foglio "Intro" svolge in pratica la cruciale funzione di trattamento dei dati precedentemente acquisiti. Nella prima tabella presente in questo foglio è necessario inserire i parametri relativi alle tecnologie ipotizzate come applicabili per la pianificazione. Tali parametri, come precedentemente già accennato, sono:

- Nome della tecnologia
- Potenziale energetico sostituibile ( $a_i$ )
- Sovracosto di conversione unitario ( $b_i$ )
- Riduzione di CO<sub>2</sub> per unità di energia sostituita ( $c_i$ )

Fornendo questi parametri verrà calcolato il valore della derivata iniziale relativo ad ogni funzione di riduzione delle emissioni di anidride carbonica. Per il buon prosieguo dell'azione di pianificazione è necessario ordinare, nella seconda tabella presente nel foglio, le tecnologie ed i relativi parametri in maniera decrescente rispetto al rispettivo valore di derivata iniziale. Una volta completata questa operazione è possibile copiare la tabella appena ultimata ed incollarla sull'omologa presente nel successivo foglio, "Budget". Il procedimento di pianificazione è ormai praticamente ultimato. Basta infatti inserire in questo foglio, nell'apposita casella, il valore di budget che si ipotizza impiegabile per ottenere il numero delle tecnologie che possono entrare nel meccanismo di pianificazione. Selezionando il foglio relativo al numero delle tecnologie precedentemente ricavato si ottiene la quota parte di budget allocato ad ogni tecnologia e la relativa diminuzione di emissioni di anidride carbonica che è possibile conseguire. I successivi fogli possono servire qualora si fosse interessati alla visualizzazione grafica dei risultati od al confronto tra diversi scenari di pianificazione relativi a differenti livelli di budget.

## IL CASO LIGURIA

Le valutazioni effettuate riguardo alla Liguria hanno evidenziato forti discrepanze rispetto a quanto contenuto nell'attuale PEAR, anche perché quest'ultimo appare configurarsi maggiormente come un documento di dichiarazioni di intenti rispetto ad una reale pianificazione operativa. Basti riportare come esempio la sostanziale mancanza di un piano finanziario strutturato, al quale sono dedicate solamente le ultime tre pagine, nelle quali si fa riferimento a generici canali di possibile finanziamento, senza indicare alcun tipo di principio di priorità.

I risultati ottenuti dalle simulazioni svolte, presentati esclusivamente in qualità di esempio, hanno messo in luce come, a fronte di una disponibilità finanziaria di 180 000 000 € su dieci anni, è possibile ottenere una riduzione delle emissioni di anidride carbonica pari a circa 750 000 t.

Confrontando i risultati delle simulazioni con le scelte operative contenute nell'attuale PEAR, si possono evidenziare le seguenti differenti valutazioni:

- I contributi dell'**idroelettrico** e dell'**eolico** appaiono sottostimati nell'attuale pianificazione, che non prevede infatti aumenti dello sfruttamento della prima fonte ed ipotizza l'installazione di 8 MW della seconda. Secondo le analisi svolte per questa tesi tali tecnologie rappresentano invece uno strumento estremamente potente per la riduzione delle emissioni di anidride carbonica, contribuendo complessivamente a poco meno di un quinto della riduzione totale a fronte dell'attribuzione di poco più del 10% del budget complessivo. Per fare un confronto numerico si pensi che, supponendo pari a 0.3 il fattore di carico degli impianti eolici (ovvero 2 628 ore di funzionamento annue), si ottiene, utilizzando il valore di energia sostituita in uscita al processo di ottimizzazione, una potenza installata pari a 40 MW, ben 5 volte quello ipotizzato dal PEARL

- La linea di intervento inerente le tecnologie di **pompaggio di calore**, sostanzialmente relegata dal PEARL nella generica gamma delle applicazioni atte all'aumento dell'efficienza energetica, ricopre invece per la presente trattazione un ruolo di primissimo piano. Ben il 30% della riduzione di emissioni di anidride carbonica cui si perviene è infatti proveniente da interventi di questa tipologia, assegnatari di poco più del 30% delle risorse complessivamente disponibili

- Discorso analogo per gli interventi che fanno ricorso a tecnologie **cogenerative**, anch'essi inglobati nella sommaria dicitura "aumento dell'efficienza energetica". Poco più del 16% della riduzione delle emissioni di anidride carbonica è infatti dovuta alla messa in opera delle due tipologie rientranti nel meccanismo di ottimizzazione (cogenerazione olio/gas e gas/gas), cui spetta complessivamente poco meno del 15% del budget ipotizzato per lo scenario in esame

- Per quel che riguarda l'impiego della **biomassa**, si assiste invece ad una sostanziale convergenza delle valutazioni. Se infatti il PEARL ipotizza un utilizzo di tale risorsa pari al 16% del potenziale massimo proposto dal Cesen, il valore cui si è pervenuti tramite le operazioni di ottimizzazione risulta pari al 12% di quella stessa cifra, andando a coprire il 28% della riduzione delle emissioni di anidride carbonica a fronte di un'allocazione del 33% delle risorse disponibili

- Rispetto all'utilizzo a fini energetici dei **R.S.U.**, si perviene nuovamente ad una non trascurabile discrepanza di valutazioni, ottenendo un'energia sostituibile pari a 150 GWh contro i 250 ipotizzati dal PEARL. Il contributo alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica degli interventi afferenti questa linea son pari al 6,5% a fronte di quasi l'8% delle risorse disponibili accordate

- Risultano di conseguenza sovrastimati i contributi, ipotizzati dal PEARL, ottenibili dall'impiego delle tecnologie **solari** e dagli altri interventi inerenti l'**efficienza energetica** (isolamento termico, illuminazione, efficienza elettrica).

E' interessante notare come queste differenze siano principalmente imputabili al fatto che le valutazioni contenute nell'attuale documento di pianificazione energetica provengono essenzialmente da analisi si potenziali massimi dei vari interventi, non tenendo in debito conto, cioè, le problematiche legate ai sovracosto, aspetto che invece assume

larghissima importanza nella presente metodologia di pianificazione.

## CONCLUSIONI

Per quel che riguarda la metodica di pianificazione proposta, c'è da evidenziare come questa debba necessariamente passare attraverso un'ulteriore fase di implementazione. Persistono ancora infatti problematiche relative alle ipotesi di lavoro formulate che debbono essere analizzate con maggiore dettaglio. Ad esempio, l'ipotesi di andamento esponenziale della penetrazione di una tecnologia al crescere del finanziamento accordato, per quanto seducente (e, almeno intuitivamente, non certo priva di fondatezza), necessita di essere verificata con maggiore rigore e definita con migliore precisione (ad esempio si potrebbe indagare circa il grado del polinomio che fa da esponente della funzione. Ovvero, bastano soli tre parametri per definire la correlazione o ne servono altri? E come determinarli?). Inoltre il calcolo dei parametri che permettono di tracciare le funzioni, soprattutto il sovracosto specifico relativo ad ogni linea di intervento, dovrebbe appoggiarsi su studi maggiormente dettagliati. Questo progressivo affinamento della metodica di pianificazione oggetto della presente tesi deve però essere portato avanti solo in funzione del suo reale vantaggio ai fini della corretta definizione delle politiche del piano. Non bisogna dimenticare infatti che la metodica proposta, basata essenzialmente su di una semplice modellizzazione tramite algoritmo, si presenta semplicemente come uno strumento per la pianificazione, che può quindi trovare la sua massima utilità solo se mediato dall'acume politico.

Nonostante le imperfezioni fin qui messe in luce, si ritiene che la procedura per la redazione di piani energetici proposta abbia il grande merito di mettere in luce tre aspetti molto rilevanti. Il primo riguarda l'attenzione specifica che viene conferita alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica, che risulta il fine ultimo dell'opera di pianificazione. Secondariamente vi è il tentativo di tenere in debito conto le sempre maggiori difficoltà che si incontrano all'aumentare del grado di penetrazione del territorio assunto da una tecnologia.

In ultimo, ma non meno importante, si evidenzia il fatto che l'approccio proposto, muovendo dalla volontà di formulare un possibile standard per la compilazione dei futuri documenti di pianificazione, è definito, dal punto di vista concettuale, da una serie di semplici ed intuitivi principi, che lo rendono un buon candidato come punto di partenza per la definizione di quelle semplici, ma non per questo meno rigorose, e condivise regole che dovrebbero essere alla base della stesura dei PEAR.

## NOMENCLATURA

PEAR: Piano Energetico Ambientale Regionale  
PEARL: Piano Energetico Ambientale Regione Liguria  
PRTQA: Piano Risanamento e Tutela Qualità dell'Aria  
UN-FCCC: Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici  
CO<sub>2</sub>: anidride carbonica  
f: funzione da ottimizzare  
g: funzione di vincolo  
 $\lambda$ : moltiplicatore di Lagrange  
L: Lagrangiano  
n: numero interventi pianificabili  
i: indice ricorsivo  
C: budget disponibile per la pianificazione  
C<sub>i</sub>: risorsa allocata all'i-esimo intervento  
CO<sub>2i</sub>(C<sub>i</sub>): funzione che lega la riduzione delle emissioni di anidride carbonica imputabile all'i-esimo intervento a fronte dell'allocazione allo stesso della risorsa C<sub>i</sub>  
A<sub>i</sub>: potenziale massimo di riduzione di CO<sub>2</sub> per l'i-esima tecnologia [t]  
B<sub>i</sub>: costante di sovracosto di conversione per l'i-esima tecnologia [1/€]  
a<sub>i</sub>: potenziale energetico sostituibile con la i-esima tecnologia [GWh]  
b<sub>i</sub>: sovracosto unitario di conversione per l'i-esima tecnologia [€/GWh]  
c<sub>i</sub>: riduzione di CO<sub>2</sub> per unità di energia sostituita per l'i-esima tecnologia [t/GWh]  
R.S.U.: rifiuti solidi urbani

## **GREEN PUBLIC PROCUREMENT: UNA SPINTA PER LA REALIZZAZIONE DI PRODOTTI PIÙ PULITI UN CASO APPLICATIVO NEL SETTORE LEGNO-ARREDO**

Roberto Luciani<sup>1</sup>, Luca Andriola<sup>1</sup>, Alessandra Zamagni<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ENEA, Roma – <sup>2</sup>ENEA, Bologna

### **SOMMARIO**

Il Green Public Procurement (GPP), ossia l'integrazione degli aspetti ambientali nei processi di acquisto delle Pubbliche Amministrazioni, è uno degli elementi strategici individuati dalla Comunità Europea per spingere le aziende verso la produzione di prodotti più puliti. Il sistema coinvolge non solo gli acquirenti di beni/servizi ma in parallelo anche i produttori, che devono essere in grado di fornire prodotti con migliori performances ambientali lungo l'intero ciclo di vita. Per tale motivo è necessario incentivare nell'industria l'utilizzo di corretti strumenti di analisi e di comunicazione dei risultati.

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescendo delle iniziative intraprese, sia a livello Europeo che nazionale: un caso di interesse è rappresentato dal Laboratorio GPP, finalizzato a favorire lo sviluppo di una domanda di prodotti verdi attraverso l'individuazione di strumenti e criteri specifici per il settore legno-arredo.

Nella presente relazione verranno illustrate le principali caratteristiche del GPP e lo stato di attuazione a livello europeo e italiano, con particolare riferimento all'iniziativa del Laboratorio GPP condotta all'interno del progetto LIFE "LAIPP" finalizzato allo sviluppo e alla diffusione degli strumenti di Politica Integrata di Prodotto nell'industria del mobile.

### **PREMESSA**

La Pubblica Amministrazione (ovvero le Amministrazioni centrali e locali ma anche le aziende pubbliche di servizi, come trasporti, gestione rifiuti, fornitura di acqua e gas, ospedali ecc.) muove risorse economiche stimate intorno al 17% del PIL Italiano.

Si capisce come la capacità, da parte dei soggetti pubblici di indirizzare tali risorse verso prodotti e servizi ecologicamente sostenibili, possa incidere profondamente sul mercato orientandolo verso produzioni sempre più pulite.

Oltre che per l'efficacia collegata alle dimensioni del settore, tale pratica è anche consigliabile per ragioni di coerenza e credibilità del sistema pubblico nei confronti dei privati e dei cittadini oltre che come strumento di incentivazione di pratiche di sostenibilità delle imprese.

Per questo motivo, già da alcuni anni, la Comunità Europea e, a livello nazionale, il Ministero dell'Ambiente ed alcune amministrazioni locali, si stanno muovendo per promuovere ed attuare pratiche di quello che viene denominato "Green Public Procurement" (GPP).

Con questo termine si fa riferimento all'integrazione degli aspetti ambientali nei processi di acquisto delle Pubbliche Amministrazioni: significa quindi rivedere le procedure di acquisto sulla base non solo del costo monetario del prodotto/servizio ma anche sulla base degli impatti ambientali nell'arco dell'intero ciclo di vita, nel rispetto dei principi di fondo che regolano gli appalti pubblici di fornitura (trasparenza, pari opportunità).

Esso può rappresentare anche uno strumento di spinta per altri strumenti di gestione ambientale istituzionali e non come, ad esempio Ecolabel, EMAS, la certificazione ISO 14001 e le etichette ecologiche di prodotto. Il riconoscimento del loro valore aggiunto in sede di definizione di acquisti e appalti

rappresenta infatti un forte stimolo per le imprese a raggiungere le performances ambientali richieste dalle Pubbliche Amministrazioni.

Il GPP si presenta quindi come uno strumento dalle grandi potenzialità, in quanto capace di influenzare il mercato, le imprese e i prodotti/servizi e di favorire l'integrazione non solo delle politiche ambientali nelle altre politiche perseguite dall'ente ma anche dei diversi strumenti di politica ambientale, in accordo con quanto promosso dalla Politica Integrata di Prodotto (IPP).

### **1. IL PANORAMA INTERNAZIONALE**

Nell'ultimo decennio le iniziative e le esperienze di Green Public Procurement (GPP) si sono moltiplicate sia a livello internazionale che nazionale.

Il rapporto ICLEI World Busy Green fornisce una rassegna di molte esperienze su scala internazionale mediante l'analisi dei diversi strumenti che sono stati adottati dai vari stati ovvero: prescrizioni normative, linee guida nazionali, strumenti di diffusione, direttive.

In generale lo strumento fondamentale per la diffusione del Green Public Procurement è rappresentato dall'elaborazione di linee guida e manuali contenenti specifiche tecniche per singole categorie di prodotti.

Tra le esperienze più significative è da segnalare quello avviato negli Stati Uniti con la direttiva Clinton EO 12873 [2]

---

<sup>1</sup> ICLEI (International Council for Local Environmental Initiatives) è una associazione non governativa che aiuta le amministrazioni locali a perseguire gli obiettivi dello sviluppo sostenibile

del 1993 successivamente ampliata con la nuova direttiva EO 13101 [3] in cui si richiede a tutti gli Enti Federali di valutare e dare preferenza nelle politiche di acquisto a prodotti e servizi “ambientalmente preferibili” e di ricorrere dove possibile a prodotti bio-based (ovvero prodotti commerciali o industriali che utilizzano prodotti biologici o risorse agricole e forestali rinnovabili).

L'EPA (Environmental Protection Agency) ha attivato una serie di iniziative tra le quali la più significativa è rappresentata dal un servizio informativo in rete l'Environmental Preferable Purchasing (<http://www.epa.gov/opptintr/epp/>) in cui vengono fornite indicazioni per gli acquisti di prodotti e servizi quali: Edifici, Tappeti, Pulizie, Conferenze, Copiatrici, Elettronica e Servizi di ristorazione.

Nel sito dell'Environmental Preferable Purchasing è contenuto anche un ricco Data Base con informazioni di tipo ecologico relative a numerose categorie di prodotti/sevizi.

Ulteriori approfondimenti sono possibili alla pagina internet <http://www.epa.gov/opptintr/epp/>.

## 2. IL GPP NELLE POLITICHE COMUNITARIE

Il ricorso allo strumento GPP viene caldeggiato da tempo dall'Unione Europea che ne tratta diffusamente nel “Sesto Programma d'Azione in campo ambientale” e nel “Libro verde sulla politica integrata dei prodotti – IPP”. L'Unione Europea inoltre ha prodotto molti documenti specifici di carattere politico e tecnico in materia, tra i quali ricordiamo:

- Il Libro Verde sugli appalti pubblici;
- La Comunicazione Interpretativa della Commissione COM(2001) 274 “Il diritto comunitario degli appalti pubblici e le possibilità di integrare considerazioni di carattere ambientale negli appalti pubblici”;
- La Comunicazione della Commissione (2003) 301 “Verso una Strategia tematica per la prevenzione ed il riciclo dei rifiuti”;
- Le Direttive sugli acquisti pubblici 2004/17 e 2004/18 del 31/3/04 sul coordinamento delle procedure di acquisto e aggiudicazione: “specifici riferimenti e requisiti per l'adozione di criteri ambientali nella selezione delle specifiche tecniche e nei criteri di aggiudicazione”;
- Il Manuale sul GPP della Commissione UE “Buying green!” (SEC(2004) 1050) del 18/8/04: linee guida applicative per la PA.

In particolare, con la COM(2001) 274 l'Unione Europea analizza e mette in luce la possibilità di integrare considerazioni di carattere ambientale negli appalti pubblici.

Il documento si riferisce sostanzialmente a tre tipologie di appalto:

- appalti di lavori nel cui ambito si può richiedere ad esempio la progettazione di edifici con basso consumo di energia, installazione di cellule solari etc. Le richieste possono spaziare oltre che nella fase di progettazione anche in quella di esecuzione dei lavori;
- appalti di servizi nel cui ambito si possono inserire specifiche riguardanti l'uso di particolari prodotti per la pulizia degli edifici etc;
- appalti di forniture che possono riguardare ad esempio l'acquisizione di prodotti finali ottenuti con criteri ambientali.

Nel documento sono fornite anche indicazioni per quanto concerne la possibilità di prescrivere nei capitolati d'appalto i materiali di base da utilizzare, i procedimenti di produzione, la possibilità di ricorrere a marchi ecologici, le modalità di selezione dei candidati. Viene inoltre indicata la possibilità di esigere un'esperienza specifica nel campo ambientale e la richiesta di fornitori che abbiano implementato un sistema di gestione ambientale.

## 3. LE ESPERIENZE IN AMBITO EUROPEO

I Paesi europei si sono già da tempo attivati sul tema del GPP, dapprima autonomamente e poi nella direzione tracciata dal Libro Verde, con molte iniziative.

La Danimarca con l'“Action Plan for Sustainable Public Procurement Policy”, ha definito una propria politica e un piano d'azione per gli acquisti verdi.

L'EPA danese ha reso disponibili linee-guida per 50 categorie di prodotto consultabile su piattaforma Internet .

In Germania, oltre ad azioni promosse a livello locale, il Ministero dell'Ambiente in collaborazione con l'associazione dei consulenti ambientali, ha creato una piattaforma Internet con una raccolta di standard, linee-guida, casi-studio e report a supporto delle politiche di acquisto pubbliche.

In Austria il Beschaffungs Service Austria fornisce consulenza per gli acquisti ecologici e il Consiglio dei Ministri dell'Austria ha introdotto linee-guida per tutti gli acquisti dell'amministrazione federale.

Nel Regno Unito, all'interno del programma “Greening Government” è stato promosso il “green procurement” a tutti i livelli della pubblica amministrazione e una direttiva congiunta del Ministero del Tesoro e dell'Ambiente individua le modalità per integrare gli aspetti ambientali nelle procedure di acquisto pubblico. E' stato inoltre redatto un manuale che fornisce indicazioni e standard per l'acquisto di 17 categorie di prodotto.

Nell'ambito delle attività di “Green Government” sono state organizzati vari siti Internet diretti a fornire servizi di orientamento all'acquisto ambientale mediante database di prodotti.

In Norvegia il GRIP Centre, istituzione promossa dal Ministero dell'Ambiente in collaborazione con le associazioni imprenditoriali, sindacali, ambientaliste, dei consumatori e con le amministrazioni locali, ha predisposto manuali e linee-guide per gli acquisti ecologici nelle pubbliche amministrazioni.

Grande rilievo riveste la campagna per gli acquisti responsabili Procuro+, cui aderiscono organizzazioni pubbliche di vari paesi europei, che hanno elaborato criteri di preferibilità ambientale per una serie di prodotti e servizi ritenuti particolarmente incisivi o significativi nella spesa pubblica: apparecchiature elettroniche; servizi di pulizia; alimentazione biologica; efficienza energetica negli edifici; servizi di trasporto pubblico; elettricità verde da fonti rinnovabili.

## 4. POLITICHE E INIZIATIVE A SOSTEGNO DEL GPP A LIVELLO NAZIONALE

In linea con gli indirizzi Comunitari anche l'Italia si è prontamente dotata di strumenti di indirizzo e tecnici ed ha attuato misure di accompagnamento per iniziative di Green Public Procurement, alcune delle quali sono illustrate nella tabella sottostante.

Provvedimenti Legislativi in materia di GPP in Italia	
Provvedimento	Contenuti
D.Lgs. 22 del 1997	Pubbliche Amministrazioni devono acquistare una percentuale di carta riciclata pari almeno al 40% del totale.
D.M. 27/03/98	Nel rinnovo del parco autoveicolare le Amministrazioni dello Stato, delle Regioni, degli enti locali e dei gestori di servizi pubblici devono acquistare il 30% nel 2001 (il 50% nel 2003) di veicoli a carburanti alternativi.
L. 448 del 2001, finanziaria 2002	Disposizioni alle Pubbliche Amministrazioni affinché almeno il 20% dei pneumatici necessari agli automezzi siano costituiti da pneumatici ricostruiti (art. 52, comma 14); disposizioni per l'utilizzo nelle pubbliche amministrazioni di beni ottenuti con materiali riciclati.
DM 203/2003	Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno stesso.
Circolare MinAmbiente 8 giugno 2004 (Dm 203/2003)	Indicazioni per l'operatività nel settore tessile e abbigliamento.
Circolare 4 agosto 2004 (Dm 203/2003)	Indicazioni per l'operatività nel settore plastico.
Circolare 3 dicembre 2004 (Dm 203/2003)	Indicazioni per l'operatività nel settore legno e arredo.
Circolare 22 marzo 2005 (Dm 203/2003)	Indicazioni per l'operatività nel settore degli ammendanti.

A livello nazionale il riferimento più interessante è rappresentato dalla “Strategia d’Azione ambientale per lo sviluppo sostenibile” redatta dal Ministero dell’Ambiente e approvata dal CIPE nell’Agosto 2002 che cita, tra gli strumenti di maggiore rilievo, il Green Public Procurement e prevede che la Pubblica Amministrazione debba raggiungere entro il 2006 determinati obiettivi (es. almeno il 30% dei beni acquistati dovrà rispondere anche a requisiti ecologici quali il contenuto di materia riciclata, il 30-40% del parco dei beni durevoli dovrà essere a ridotto consumo); e da altri provvedimenti che, in massima parte, hanno stabilito criteri ed obiettivi per l’acquisto di specifiche tipologie di prodotti da parte delle Pubbliche Amministrazioni.

In Italia quindi non è presente una norma generale che regoli il GPP, ma possiamo dire che con il recepimento delle Direttive comunitarie in materia di Appalti attraverso il “Codice degli Appalti”, la tutela ambientale ha raggiunto una sua definizione dal punto di vista normativo.

In particolare all’interno del Codice degli Appalti due sono gli aspetti che destano maggiore interesse:

il principio di economicità può essere subordinato, entro determinate condizioni, a criteri ispirati a esigenze sociali, nonché alla tutela della salute e dell’ambiente e alla promozione dello sviluppo sostenibile;

è possibile inserire nel bando di gara criteri in materia ambientale o sociale, purché tali criteri siano collegati con l’oggetto dell’appalto, non conferiscano alla Pubblica Amministrazione una libertà incondizionata di scelta e rispettino i principi fondamentali del Trattato UE.

Un’importante opera di disseminazione delle conoscenze e delle pratiche GPP in Italia è stata svolta anche dall’APAT con il progetto “Preparazione e applicazione sperimentazione di strumenti per la diffusione di politiche di acquisto corrette ed ambientalmente sostenibili da parte degli Enti Pubblici”. A partire da questa iniziativa diversi Enti Locali hanno sviluppato programmi di intervento nel campo del GPP dei quali si riporta una sintesi di alcune di queste iniziative nella tabella a pagina seguente. L’aspetto di maggiore interesse è rappresentato al momento dal Piano d’Azione Nazionale per il GPP che il Ministero dell’Ambiente sta predisponendo, in

accordo alla Comunicazione della Commissione Europea “Politica Integrata dei Prodotti – sviluppare il concetto di ciclo di vita ambientale” che demanda agli Stati membri l’adozione, entro la fine del 2006, di un Piano d’Azione nazionale sul il GPP. Il Piano d’Azione che ha l’obiettivo di promuovere la diffusione del GPP presso gli enti pubblici ed intende favorire le condizioni necessarie per ottimizzare le potenzialità del GPP come strumento per il miglioramento ambientale.

Il Piano d’Azione Italiano, conformemente con le indicazioni fornite dalla Commissione, ha anche lo scopo di definire, per prodotti e servizi identificati come prioritari per quanto riguarda gli impatti ambientali e i volumi di spesa, le indicazioni metodologiche per la costruzione dei processi di acquisto verde e dei criteri ecologici da inserire nei capitolati di gara.

Con un input così forte a livello centrale si creano le condizioni per incrementare la diffusione e la penetrazione del GPP presso gli enti, fornendo da un lato gli strumenti pratici per la sua implementazione, ma mettendo mano anche ad un’opera di sistematizzazione delle informazioni e delle formazioni necessarie per la sua attuazione.

## 5. GREEN PUBLIC PROCUREMENT – COME OPERARE

Come si deve comportare una Pubblica Amministrazione che vuole adottare iniziative di GPP? Rispondere a questa domanda è essenziale per aiutare le stesse Amministrazioni a diffondere queste pratiche.

Il processo da compiere si può schematizzare nelle azioni seguenti:

1. selezionare i prodotti/servizi cui applicare il GPP;
2. individuare criteri di selezione ecologici per i fornitori;
3. individuare i criteri ecologici per il prodotto/servizio da inserire nei bandi di gara e nei contratti;
4. inserire i criteri ecologici all’interno del bando di gara o del contratto di fornitura.

ALCUNE ESPERIENZE DI GPP IN ITALIA		
Anno	Ente	Tipo di esperienza
2000	APAT	Sviluppo di Linee Guida e attività per la provincia di Torino, il Comune di Ferrara, il Comune di Firenze, APPA Trento, AGAC
2001	APAT	Documento orientativo per l'applicazione del GPP
2001/2003	Provincia di Lecco Lagambiente Lombardia	Caratterizzazione degli acquisti verdi e Implementazione di un sistema GPP.
2001	Provincia di Rimini	Realizzazione di Linee Guida per gli acquisti verdi negli alberghi. Sviluppo di strategie e strumenti per un turismo sostenibile del Mediterraneo.
2001	Consip	Predisposizione di bandi di convenzione di carta da copie da fibra vergine e carta da fibre riciclate.
2001	Comune di Ferrara	Realizzazione di un Manuale per gli acquisti verdi: scuolabus, carta per stampanti, etc
2002	ARPA Toscana	Elaborazione di bandi ambientalmente preferibili e formazione al GPP.
2003	Provincia di Cremona	Progetto GPPinfoNET un network finanziato da EU – Life Ambiente animato da un bollettino bimestrale; valutazione e riduzione degli impatti ambientali legati alla fornitura di energia e acqua; gestione di cantieri edili, stradali e opere di restauro nel rispetto dell'ambiente
2003	Comune di Jesolo	Implementazione del piano IPP e creazione di domanda di prodotto di consumo e tecnologie verdi per il settore alberghiero
2003	Provincia di Bologna	Progetto "Acquisti Verdi" (GPP – Green Public Procurement) rivolto a Enti Locali, Imprese, associazioni no-profit e consumatori
2003	Ministero dell'Ambiente	Promozione e diffusione del GPP tramite un CDROM inviato alle amministrazioni con più di 5000 abitanti.
2003/2004	Comune di Bologna	Agenda 21 locale, introduzione di criteri ambientali e sociali nelle gare d'appalto e di acquisto di prodotti e servizi.
2004	Provincia di Torino	Agenda 21, orientamento verso le politiche di GPP
2004	Provincia di Roma	Realizzazione e implementazione di linee guida per la pubblica amministrazione

Le azioni da compiere devono tenere conto del fatto che gli appalti pubblici devono rispondere a regole precise che garantiscano la trasparenza e la non discriminazione di produttori e prodotti e che l'applicazione di questi principi comporta:

- la definizione dell'oggetto dell'appalto;
- la selezione dei candidati secondo requisiti obiettivi;
- l'attribuzione del contratto sulla sola base del prezzo o, in alternativa, sulla base di una serie di criteri obiettivi;

Per contemperare gli obiettivi prefissati con tali esigenze si possono adottare alcuni accorgimenti.

### 5.1 Selezionare i Prodotti/Servizi cui Applicare il GPP

L'Amministrazione dovrà, per prima cosa, definire un elenco di prodotti/servizi sui quali cominciare ad applicare politiche di GPP.

Questa valutazione potrà essere fatta tenendo conto, per le diverse categorie di prodotto/servizio oggetto di appalto da parte dell'Amministrazione stessa, di fattori come:

- la rilevanza in termini quantitativi e di impatto della fornitura;
- la disponibilità sul mercato di prodotti/servizi ecologici;
- l'esistenza di criteri ecologici facilmente ed oggettivamente dimostrabili (marchi ecologici, ecc.).

### 5.2. Individuare Criteri di Selezione Ecologici per i Fornitori

Una volta selezionate le categorie di prodotti e servizi a cui applicare criteri di GPP il primo fattore sul quale si può intervenire inserendo qualche criterio ecologico è la selezione dei fornitori. Anche in questo caso bisogna tenere conto delle restrizioni connesse agli obblighi di legge precedentemente esposti che consentono comunque di intervenire principalmente attraverso:

Esclusione di un candidato dalla partecipazione ad una gara.

Tra i motivi di esclusione rientrano diverse ipotesi fra le quali la condanna, con sentenza passata in giudicato, per qualsiasi reato che incida sulla moralità professionale; pertanto nel caso in cui la legge qualifichi l'inosservanza delle norme in materia ambientale come un reato che incida sulla moralità professionale (alcuni paesi, come la Spagna, hanno introdotto nei codici penali i cosiddetti "reati ecologici"), sussiste l'esclusione.

Richiesta del possesso di determinati requisiti.

Nella selezione dei candidati, inoltre, una commissione aggiudicatrice potrebbe anche esigere un'esperienza specifica in materia ambientale da dimostrare attraverso precedenti lavori o tramite l'adesione ad un sistema di gestione ambientale (EMAS o ISO 14001). L'adesione ad un Sistema di Gestione Ambientale può valere come prova della capacità tecnica dei candidati solo se influisce sulla qualità della

fornitura o sulla capacità di un'impresa di realizzare un appalto con criteri ecologici.

### **5.3. Individuare i Criteri Ecologici per il Prodotto/Servizio da Inserire nei Bandi di Gara e nei Contratti**

Questa è sicuramente la parte più tecnica; bisognerà individuare, per ogni prodotto/servizio, i requisiti ambientali da richiedere in sede di appalto.

Per fare questo è necessario guardare alle caratteristiche del prodotto/servizio in oggetto lungo tutto il suo ciclo di vita, quindi dall'estrazione delle materie prime necessarie a produrre il bene o ad erogare il servizio, fino allo smaltimento dei rifiuti prodotti dal bene o dal servizio.

Questo però non richiede necessariamente la realizzazione di uno studio di LCA (Life Cycle Assessment) su ciascun prodotto in quanto ci si può avvalere di:

informazioni già esistenti su quel tipo di prodotto/servizio; ci si può avvalere per questo di documenti quali il Manuale di GPPNET o il Focus trasversale Acquisti Verdi della Provincia di Bologna;

marchi ecologici già esistenti che comprovano il possesso di determinati requisiti ecologici complessivi (Ecolabel, ecc.) o parziali (etichette energetiche, ecc.).

### **5.4. Inserire i Criteri Ecologici all'interno del Bando di Gara o del Contratto di Fornitura**

Una volta individuati i criteri ecologici per un determinato prodotto/servizio rimane la parte più delicata da un punto di vista legale: l'introduzione di tali criteri nei capitolati d'appalto.

Attualmente la normativa vigente per gli appalti pubblici contempla due modalità possibili per l'aggiudicazione di un appalto:

il prezzo più basso;

l'offerta economicamente più vantaggiosa.

Ovviamente è solo adottando la seconda modalità che si possono introdurre criteri ecologici.

Il concetto da utilizzare può essere quello per cui un'offerta è economicamente più vantaggiosa non quando un prodotto costa meno ma quando i costi di gestione e il rapporto costo/efficacia sono migliori.

Da questo punto di vista, oltre naturalmente agli aspetti relativi alla sicurezza ed alla qualità, si può tenere conto, nella valutazione dei costi sostenuti durante l'intera vita di un prodotto di:

costi di gestione diretti: energia, acqua e altre risorse utilizzate durante il ciclo di esistenza del prodotto;

spese finalizzate a realizzare un risparmio: es. un efficace sistema di isolamento che permetta di risparmiare energia e quindi denaro;

costi di manutenzione;

costi di riciclaggio del prodotto.

Un supporto estremamente utile in questa fase può essere certamente rappresentato da alcuni siti web che riportano informazioni interessanti e capitolati di gara.

Tra questi segnaliamo quello della Provincia di Cremona che contiene decine di capitolati (<http://www.compraverde.it/come/bandi.html>) e della Provincia di Torino <http://www.buoneinpratica.it/acquisti/resoconti.shtm>.

## **6. IL LABORATORIO GPP DEL PROGETTO LAIPP**

Si è da poco conclusa nella regione Marche l'esperienza del Laboratorio GPP, un tavolo di lavoro finalizzato a favorire lo sviluppo di una domanda di prodotti verdi attraverso l'individuazione e sperimentazione di strumenti e criteri specifici per il settore legno-arredo [19].

L'esperienza, coordinata da COSMOB e realizzata presso il laboratorio tecnologico per la qualità di COSMOB a Pesaro, è stata presentata anche in occasione del convegno Ecoprocura 2006 a Barcellona, e ha riscosso grande interesse grazie agli elementi di novità introdotti, primi tra i quali l'approccio settoriale con riferimento al territorio, il coinvolgimento di tutti i soggetti interessati e l'attenzione posta sugli strumenti orientati al ciclo di vita come base per i criteri ecologici.

Il Laboratorio ha consentito di passare da una fase sostanzialmente improntata a stimolare la partecipazione "volontaria" e l'auto-organizzazione dei diversi soggetti interessati ad una fase di più estesa "promozione", con un'azione in grado non solo di accrescere la sensibilizzazione su questi temi ma anche di fornire ai diversi soggetti conoscenze e strumenti.

In particolare sono stati sviluppati interventi integrati diretti da un lato a supportare gli operatori delle PA nella redazione ed attuazione di bandi di GPP, dall'altro a mettere le aziende del territorio in grado di attrezzarsi per rispondere al meglio a tali bandi. Quest'ultimo aspetto è stato possibile grazie al progetto LIFE LAIPP (rif. a box), finalizzato allo sviluppo e diffusione degli strumenti necessari per intraprendere percorsi di innovazione ambientale nel settore legno-arredo della Regione Marche.

### **6.1. Un Approccio Settoriale: il Territorio e i Soggetti che vi Operano**

La scelta di operare nel settore legno-arredo è stata dettata da diversi fattori, tra i quali si possono annoverare la rappresentatività sul mercato italiano e straniero, la struttura basata su piccole e medie imprese e la forte propensione all'innovazione. Il settore occupa una posizione di eccellenza che caratterizza il made in Italy, e grande rilievo in questo contesto riveste il distretto produttivo della Regione Marche, che si dimostra attento ed interessato al miglioramento della propria immagine anche sul piano della salvaguardia ambientale.

Il Laboratorio GPP, sviluppato in un arco di 4 incontri, ha rappresentato l'opportunità di riunire tutti i soggetti attivi sul territorio che gravitano attorno al GPP, per mettere a disposizione le competenze necessarie per superare le barriere tuttora presenti per l'attuazione degli acquisti verdi su ampia scala e in maniera coordinata (rif. a tabella).

### **6.2 L'attività di Laboratorio**

L'iniziativa, promossa dal Comune di Pesaro in qualità di partner del progetto, fa seguito ad un percorso di sensibilizzazione sulle tematiche del GPP già intrapreso dalla regione Marche. Le tematiche affrontate sono state le seguenti:

Analisi delle attuali procedure di acquisto delle forniture d'arredo da parte degli Enti locali;

Azione di sensibilizzazione e di formazione, sia per quanto riguarda gli aspetti metodologici del GPP che relativamente ai contenuti, in termini di specifiche tecniche per il settore legno-arredo e criteri ecologici.

Sperimentazione degli strumenti messi a disposizione dal progetto all'interno dei bandi.

### 6.3. I Criteri Ecologici: quali Strumenti di riferimento?

L'utilizzo dei criteri ecologici nell'ambito dei bandi di una PA rappresenta un nodo non ancora sciolto. Se per alcuni settori il problema può essere in parte risolto facendo riferimento ai criteri ecolabel, lo stesso non può dirsi per il settore legno-arredo in quanto i criteri sono da anni oggetto di discussione senza essere approvati. Questo ha reso necessaria un'indagine degli strumenti orientati al prodotto applicabili in questo settore, partendo da quelli attualmente utilizzati (es. FSC) e da quanto il progetto LAIPP ha messo a disposizione delle aziende: studi di analisi del ciclo di vita (LCA), POEMS (Sistemi di Gestione Ambientale orientati al prodotto), Dichiarazione Ambientale di Prodotto (DAP).

In particolare la DAP si rivela uno strumento con cui le imprese possono dialogare in maniera trasparente con le Pubbliche Amministrazioni, in quanto consente il confronto delle caratteristiche ambientali di prodotti appartenenti alla stessa categoria in un'ottica di ciclo di vita, ossia analizzando il prodotto dal momento in cui vengono estratte le materie prime per la sua fabbricazione sino al fine vita. Inoltre le informazioni contenute sono oggettive, trasparenti e credibili, quest'ultimo aspetto garantito dalla certificazione da parte di un ente terzo accreditato indipendente.

L'utilizzo della DAP in un bando, a verifica delle prestazioni ambientali richieste, in una fase iniziale in cui il mercato ne annovera ancora un numero limitato, può consentire di esercitare un forte stimolo alle aziende a promuovere l'innovazione ambientale di prodotto, in linea quindi con l'obiettivo principale del GPP

Come superare le barriere alla diffusione del GPP: un dialogo aperto tra Pubbliche Amministrazioni, imprese e strutture di supporto.

	Soggetto	Ruolo
<b>Pubbliche Amministrazioni</b>	Regione Marche Provincia di Pesaro-Urbino Provincia di Ancona Provincia di Macerata Comune di Pesaro Comune San Benedetto del Tronto Comune di Urbino Comunità Montana Urbania CCIAA Ancona	Promuovere le pratiche di GPP su tutto il territorio di competenza. La preferenza data ai prodotti verdi fornisce infatti la possibilità di instaurare una collaborazione ed un dialogo attivo con il mondo imprenditoriale, incentivando lo sviluppo delle imprese presenti sul territorio.
<b>Imprese</b>	UPPER Scavolini Elica Grossi Lamiere Mobilpref	Il GPP è un sistema che coinvolge non solo gli acquirenti di beni/servizi ma anche i produttori, che devono essere in grado di fornire prodotti che presentino risultati ambientali migliori lungo l'intero ciclo di vita. Per tale motivo è necessario incentivare nell'industria l'utilizzo di corretti strumenti di analisi e di comunicazione dei risultati.
<b>Strutture di supporto</b>	COSMOB Meccano	Centri tecnici che forniscono servizi specialistici per il settore mobiliario e della meccanica delle Marche, con la finalità di promuovere e sostenere lo sviluppo tecnologico, produttivo, commerciale e gestionale delle imprese industriali ed artigiane.
	Centro ricerche ENEA	Competenze tecnico-scientifiche in merito agli strumenti di politica ambientale (LCA, eco-progettazione, etichette ecologiche, POEMS)
	Università di Urbino Università Politecnica delle Marche	Competenze tecnico-scientifiche su tematiche ambientali; analisi della domanda da parte degli enti pubblici
	ARPAT -AF Educazione Ambientale	Formazione sugli aspetti specifici relativi al GPP
	SVIM	Sviluppo delle Politiche Industriali Regionali
	Assindustria Pesaro e Urbino	Diffusione degli strumenti nel sistema locale

## 7. CONCLUSIONI

La necessità di favorire la diffusione di prodotti e servizi più puliti è una delle priorità a livello globale a causa del contemporaneo aumento dei consumi e della popolazione che rendono sempre meno sostenibile il modello di sviluppo

attuale. Per questa ragione già da diversi anni sono stati introdotti strumenti di progettazione ecologica tali da consentire la realizzazione di prodotti a minore impatto ambientale lungo il loro intero ciclo di vita.

Tuttavia tali strumenti trovano ancora poca applicazione presso le imprese che sono pressate da altre priorità quali il

mercato, i costi di produzione, ecc. tanto che l'ambiente, pur tra le imprese più sensibili, è percepito come un valore aggiunto da perseguire in subordine rispetto alle esigenze primarie che sono di carattere economico.

Per tale ragione è necessario collegare il principio della qualità ambientale a quello principale del mercato se lo si vuole trainare e diffondere su larga base.

In questo contesto appare chiaro come la Pubblica Amministrazione rivesta un ruolo di primo piano, configurandosi come il principale consumatore di beni e servizi, in grado quindi di influenzare il mercato generando un cambiamento nei modi di produrre, amministrare e consumare.

Un'azione sempre più capillare, tendente al coinvolgimento di un numero di amministrazioni crescente ed alla definizione di criteri ecologici per prodotti e servizi sempre più numerosi consentirà sicuramente, nei prossimi anni, un traino diretto tra i fornitori delle PA e un ritorno indiretto su tutta la catena dei loro fornitori.

Questo, pertanto, potrebbe incidere anche al di là di quelle percentuali citate in precedenza mettendo in movimento un circolo virtuoso parallelamente al quale si sta muovendo anche la leva del mercato al consumo attraverso la segnalazione al consumatore dei prodotti più puliti (con marchi come l'Ecolabel europeo o altri).

Adottare il Green Public Procurement però non significa semplicemente realizzare un bando verde, ma è un processo che richiede innanzitutto una scelta politica da parte dell'ente ed una piena responsabilizzazione di tutti i livelli politici, tecnici e amministrativi coinvolti. Questo significa che la Pubblica Amministrazione dovrebbe dotarsi di una politica degli acquisti verdi, impegnandosi ad attuarla attraverso un atto formale; approvare un piano d'azione per il GPP che permetta di definire gli obiettivi di miglioramento ambientale, i beni e i servizi sui quali intervenire; inserire i criteri ecologici nelle forniture pubbliche e collaborare attivamente con il mondo imprenditoriale e i consumatori.

Relativamente a quest'ultimo aspetto, iniziative come quelle del Progetto LAIPP dimostrano come, ai fini di una buona riuscita delle pratiche di GPP, sia necessaria una forte sinergia tra Amministrazioni Pubbliche e Industria con il coinvolgimento di partner tecnico-scientifici che siano in grado di supportare, con strumenti "ad hoc", la progettazione di prodotti ecologici.

Il sistema messo in piedi con il Laboratorio GPP ha dato risultati positivi grazie all'approccio innovativo adottato caratterizzato dall'instaurarsi di un dialogo aperto tra le istituzioni pubbliche e le aziende, grazie al supporto di tutti i partner del progetto LAIPP. Le competenze e gli strumenti messi a disposizione metteranno le aziende in grado di fornire prodotti che presentano risultati ambientali migliori lungo l'intero ciclo di vita, sviluppando così nel sistema produttivo le competenze necessarie per l'utilizzo di corretti strumenti di analisi e di comunicazione dei risultati.

## RIFERIMENTI

1. ICLEI (International Council for Local Environmental Initiatives), *The World Buys Green: International Survey on National Green Procurement Practices*, Freiburg 2001.
2. USA – Government Purchasing Project - Executive Order 12873, October 20, 1993.
3. USA – Government Purchasing Project - Executive Order 13101 September 14, 1998

## GREENING THE GOVERNMENT THROUGH WASTE PREVENTION, RECYCLING, AND FEDERAL ACQUISITION.

4. Commissione Europea, VI Programma d'azione per l'ambiente della Comunità Europea, Gennaio 2001.
5. Commissione Europea, Libro verde sulla politica integrata relativa ai prodotti, (7.2.2001, COM (2001) 68) Febbraio 2001.
6. Commissione Europea, "Libro verde- Gli appalti pubblici nell'UE - Spunti di riflessione per il futuro" . Doc. COM(96) 583 def. del 27.11.1996.
7. Commissione Europea, Comunicazione Interpretativa della Commissione COM(2001) 274 "Il diritto comunitario degli appalti pubblici e le possibilità di integrare considerazioni di carattere ambientale negli appalti pubblici" [5];
8. Commissione Europea, Comunicazione della Commissione (2003) 301 "Verso una Strategia tematica per la prevenzione ed il riciclo dei rifiuti";
9. Commissione Europea, Direttiva 2004/17/EC del Parlamento e del Consiglio del 31/3/04 coordinating the procurement procedures of entities operating in the water, energy, transport and postal services sectors.
10. Commissione Europea, Direttiva 2004/18/EC del Parlamento e del Consiglio del 31/3/04 on the coordination of procedures for the award of public works contracts, public supply contracts and public service contracts.
11. Commissione Europea, Manuale sul GPP della Commissione UE "Buying green!" (SEC(2004) 1050) del 18/8/04: linee guida applicative per la P. A.
12. Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio - "Strategia d'Azione ambientale per lo sviluppo sostenibile per l'Italia" Approvata dal CIPE il 2 agosto 2002 con Deliberazione n. 57, Pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 255 del 30 ottobre 2002, supplemento ordinario n. 205.
13. Provincia di Cremona – Progetto LIFE GPP-NET - Manuale GPP - Il Green Public Procurement e le strategie per la sostenibilità.
14. Focus trasversale: Acquisti Verdi della Provincia di Bologna:  
[http://www.provincia.bologna.it/ag21/acquisti\\_verdi.html](http://www.provincia.bologna.it/ag21/acquisti_verdi.html).
15. Direzione Ambiente della Commissione Europea, Orientamenti relativi agli aspetti ambientali nel contesto degli appalti pubblici. Applicazione dei criteri del marchio comunitario di qualità ecologica, Novembre 2001.
16. Federambiente, "Il Green Public Procurement nelle imprese pubbliche di igiene urbana, Analisi di prefattibilità, Criteri per la definizione di capitolati per l'acquisto di alcuni beni e servizi", Gennaio 2004.
17. Provincia di Cremona - Settore Ambiente – MARA PESARO: GPPnet - La rete degli acquisti pubblici verdi - LIFE 02 ENV/IT/000023 - Il ruolo degli acquisti pubblici per la sostenibilità ambientale e sociale, "Terra Futura" - Firenze, 2 aprile 2004;
18. ANPA - Green Public Procurement. Manuale delle Caratteristiche dei Prodotti – Draft Ottobre 2000;
19. Acquisti sostenibili nel settore del legno-arredo – Alessandra Zamagni – Buone Pratiche – Ottobre 200



**SESSIONE**

**INQUINAMENTO ACUSTICO  
E DA VIBRAZIONI**



## UNA PANORAMICA SULLO STATO ACUSTICO DEL PAESE: L'OSSERVATORIO NAZIONALE SUL RUMORE

S. Curcuruto<sup>1</sup>, G. Bellabarba<sup>1</sup>, R. Silvaggio<sup>1</sup>, N. Tombolillo<sup>1</sup>, M. Angelucci<sup>2</sup>, C. Tibone<sup>3</sup>

<sup>1</sup>APAT, Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici - Via Brancati 48, 00144 Roma, <sup>2</sup>ARPA Umbria - Via Pievaiola S. Sisto, 06132 Perugia. <sup>3</sup>ARPA Valle d'Aosta - Loc. Grande Charrière 44, 11020 Saint Christophe, Aosta

### SOMMARIO

Un'accurata gestione dei dati ambientali, tale da consentire una corretta ed esauriente comunicazione e informazione al cittadino, facilitando la partecipazione ai processi decisionali, come prescritto dalla legislazione nazionale e dalle recenti direttive comunitarie e tale da divenire un efficace supporto alle scelte programmatiche degli amministratori, risulta una priorità, riconosciuta e condivisa. La complessità del sistema ambientale caratterizzato dalla presenza dell'inquinamento acustico, estremamente articolato nei diversi aspetti ed alle differenti scale di intervento, richiede con urgenza un sistema di riferimento per la definizione e gestione dei dati. In questo ambito APAT ed il sistema Agenziale ARPA/APPA stanno lavorando alla realizzazione dell'Osservatorio Nazionale sul Rumore, un sistema informativo con una architettura di indicatori, dati ed informazioni che descrivono e consentono l'analisi della situazione nazionale in materia di inquinamento acustico, in continuo aggiornamento. La struttura prevede informazioni riguardanti gli impatti dovuti alle principali sorgenti di rumore, lo stato di attuazione della normativa, le attività di controllo e monitoraggio condotte dal sistema agenziale, la situazione relativa all'adozione degli strumenti di pianificazione acustica. Tale strumento di gestione dei dati ambientali, accessibile mediante la rete web, si propone quale luogo di riferimento per utenti differenti, con contenuti validi per l'analisi delle diverse situazioni e con spazi dedicati ai differenti temi.

### INTRODUZIONE

L'esigenza di una informazione accurata, aggiornata ed accessibile in materia ambientale risulta sempre più pressante ed è manifestata sia da parte dei diversi soggetti istituzionali coinvolti, sia dai cittadini che esprimono maggiore interesse nei confronti delle tematiche ambientali. Una conoscenza approfondita delle dinamiche ambientali consente l'elaborazione di attività di pianificazione efficaci e preventive, supporto essenziale per l'operato dei decisori politici ed amministrativi e per le attività legislative. Altrettanto prioritarie risultano la garanzia di informazione al cittadino, attraverso l'accesso ai dati e la possibilità di essere a conoscenza delle condizioni e dello stato dell'ambiente in cui vive [1], l'avvio di forme partecipative nei processi decisionali e le garanzie di giustizia.

Relativamente a tali temi in ambito di inquinamento acustico, il Decreto Legislativo n. 194 [2], in attuazione della Direttiva 2002/49/CE [3], all'art.8, *informazione e consultazione del pubblico*, garantisce le modalità di accesso all'informazione relativa alla mappatura acustica, alle mappe strategiche ed ai piani di azione al pubblico, anche *“avvalendosi delle tecnologie di telecomunicazione informatica e delle tecnologie elettroniche disponibili”*. E' inoltre avviato il processo di consultazione dei piani, con la possibilità di presentare osservazioni e pareri in merito e vengono prese in considerazione le modalità di partecipazione del pubblico all'elaborazione dei piani di azione, introducendo in tal modo forme di partecipazione attiva dei cittadini ai processi di programmazione.

Lo stato dell'ambiente in materia di inquinamento acustico presenta attualmente notevoli elementi di criticità. Nonostante la decisa azione normativa a livello nazionale, tuttora in fase

di completa definizione dal 1995 [4], le prescrizioni legislative risultano parzialmente attuate, con sensibili differenze riscontrabili sia nelle diverse situazioni territoriali, sia in riferimento ai settori di applicazione della normativa.

Le leggi regionali di recepimento della norma nazionale non risultano emanate in tutte le regioni, l'azione di caratterizzazione acustica del territorio conseguibile attraverso le classificazioni acustiche comunali non è perseguita in maniera capillare ed omogenea, gli obblighi e le azioni di risanamento indicati dalle norme di settore subiscono ritardi e notevoli differenze nei differenti ambiti di attuazione.

In tale contesto la presenza di uno strumento di gestione e consultazione dei dati che consenta la lettura e l'analisi della situazione, continuamente aggiornata, in tema di ambiente acustico, diviene prioritario. La costruzione di una conoscenza condivisa diviene in tal modo garanzia per la definizione di azioni di governo del territorio in ambito acustico.

L'Osservatorio sul Rumore è stato pensato quale luogo nel quale è possibile avere accesso alle informazioni capaci di consentire una lettura della situazione nazionale in tema di inquinamento acustico. E' una banca dati popolabile e consultabile tramite la rete web e gestita da APAT e dal Sistema delle Agenzie Regionali e Provinciali per l'Ambiente che consente la raccolta, l'elaborazione e la valutazione dei dati.

E' uno strumento di gestione, che può proporsi quale supporto operativo valido, dedicato a diversi fruitori, sia ai decisori politici sia ai cittadini. La costituzione di un osservatorio sul rumore si affianca all'Osservatorio NIR, (*Non Ionizing Radiation*), dedicato alla tematica relativa ai campi elettromagnetici ed appartiene al sistema informativo ambientale gestito da APAT, che consente la disponibilità di informazioni caratterizzanti il quadro nazionale in riferimento

ai vari settori tematici. Coerentemente con tale struttura di reporting, la banca dati presenta una architettura basata sul modello di indicatori ambientali DPSIR, (Determinanti – Pressioni – Stato – Impatti – Risposte), introdotto dall’Agenzia Europea dell’Ambiente ed Eurostat. I dati sono di tipo puntuale, organizzati su scala regionale e provengono dalle attività di analisi, controllo e monitoraggio effettuate dalle Agenzie Regionali/Provinciali per l’Ambiente.

L’Osservatorio offre informazioni relative alla verifica delle prescrizioni legislative, alla definizione degli impatti dovuti alle principali sorgenti di rumore, alle attività di monitoraggio richieste ed intraprese, alla realizzazione degli strumenti di pianificazione acustica previsti.

## ARCHITETTURA DELL’OSSERVATORIO

L’attività del gruppo di lavoro APAT/ARPA che ha portato allo sviluppo degli applicativi informatici dell’osservatorio rumore è il proseguimento di un percorso avviato relativo alla definizione degli Osservatori ambientali per le tematiche Radiazioni ionizzanti, Radiazioni non ionizzanti e Rumore. [5]

La metodologia di acquisizione dei dati storicamente usati per il popolamento degli indicatori previsti dall’Annuario dei dati ambientali APAT [6], attraverso l’adozione di schede excel utilizzate per la raccolta di informazioni, con l’avvio dell’osservatorio sono confluite in un unico database.

E’ stata effettuata una revisione e suddivisione delle informazioni reperite dalle ARPA/APPA sulle attività di propria pertinenza, sulle attività di competenza dei Comuni relative alle azioni in campo acustico realizzate ogni anno (zonizzazioni, relazioni biennali, autorizzazioni concesse), sulle informazioni relative ai controlli e esposti, intesi come segnalazioni scritte di disturbo da rumore, rispettivamente su attività ed infrastrutture lineari di trasporto.

La Banca Dati è stata costruita in Access ed è stata implementata in ASP sul sito del SINAnet. (vedi Figura 1)



Figura 1. Schermata del Sito SINAnet. Area dedicata all’ambito Tematico “Agenti Fisici”

I dati contenuti si presentano organizzati su scala regionale e provengono prevalentemente dalle attività di controllo e prevenzione dall’inquinamento acustico, svolte dalle Agenzie Regionali/Provinciali per l’Ambiente.

La Banca Dati è strutturata in più sezioni sulla base della tipologia di dati contenuta (vedi Figura 2):

- I. SEZIONE ATTIVITÀ
- II. SEZIONE INFRASTRUTTURE
- III. SEZIONE NORMATIVA
- IV. SEZIONE DOTAZIONE
- V. SEZIONE PIANIFICAZIONE ACUSTICA

Le prime due sezioni hanno lo scopo di descrivere lo stato dell’ambiente utilizzando l’indicazione che si può ottenere conoscendo il numero di sorgenti controllate e il numero di controlli eseguiti dalle ARPA/APPA e, contestualmente, i casi in cui si sono presentati superamenti di uno dei limiti previsti dalla normativa vigente.

Le due sezioni riportano tali informazioni annuali su base regionale suddivisi per tipologie di sorgenti (Attività: produttive, di servizio, commerciali e temporanee; Infrastrutture: stradali, ferroviarie, aeroportuali e portuali). Inoltre vengono evidenziate anche le sorgenti controllate su esposto dei cittadini (direttamente e/o attraverso le Amministrazioni), questa informazione è un indicatore di quale sia la sorgente che i cittadini percepiscono come più fastidiosa.

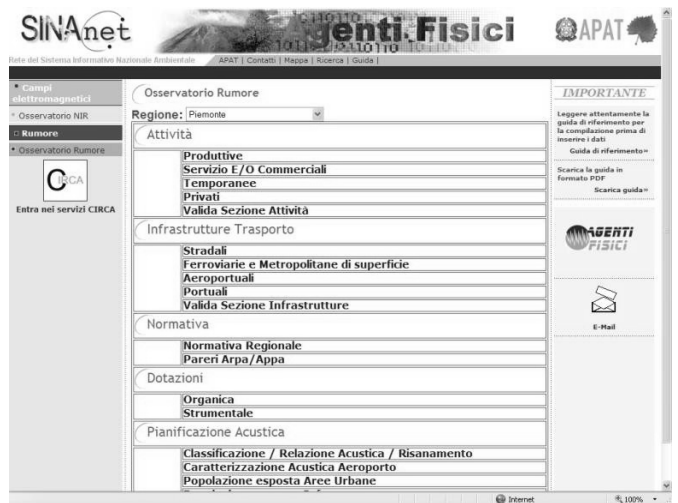


Figura 2 Schermata di accesso alle sezioni di inserimento dati

La sezione sulla Normativa è utile come indicatore della risposta messa in atto dalle Amministrazioni per affrontare il problema dell’inquinamento acustico. La sezione non contiene un mero elenco di normative a carattere regionale ma anche una breve analisi dei contenuti salienti della normativa stessa. Inoltre viene riportata, sempre su base regionale, l’attività svolta dalle ARPA/APPA in materia di emanazione di pareri tecnici volti a valutare la congruità del contenuto tecnico della documentazione prevista dalla normativa ai fini del rilascio dei pareri autorizzatori delle Amministrazioni locali (es. zonizzazioni, requisiti acustici passivi degli edifici, impatto acustico).

La sezione Dotazione è stata inserita al fine di realizzare un quadro nazionale sulle risorse umane e strumentali disponibili nelle ARPA/APPA per svolgere tutte le attività che la normativa nazionale e/o regionale demanda alle Agenzie per l’Ambiente.

Infine, la sezione Pianificazione Acustica raccoglie le informazioni riguardanti lo stato di attuazione delle zonizzazioni acustica, dei piani di risanamento e delle relazioni biennali sullo stato acustico, il tutto a livello comunale. Queste informazioni sono sempre indicative della risposta che le Amministrazioni attuano al fine della prevenzione e contenimento dei problemi legati all'inquinamento acustico.

Quest'ultima sezione raccoglie anche le informazioni inerenti gli adempimenti previsti dal Dlgs 194/2005, in recepimento della Direttiva 2002/49/CE, in particolare riguardanti la valutazione della popolazione esposta a rumore.

Le informazioni riguardano gli studi effettuati a livello regionale per valutare l'esposizione al rumore prodotto in aree urbane, nei pressi delle principali infrastrutture lineari di trasporto, nelle aree interessate dagli aeroporti. In riferimento a tali sorgenti principali si richiede il numero di popolazione esposta a determinati intervalli di valori relativi ai descrittori acustici previsti dalla Direttiva 2002/49/CE (Lden e Lnight) [7],[8].

L'ampio spazio dedicato nell'ambito della Sezione Pianificazione Acustica alla stima della popolazione esposta all'inquinamento acustico, intesa come *numero totale stimato di persone che vivono nelle abitazioni esposte a predeterminati livelli di rumore*, è dovuto al ruolo assunto dall'indicatore nella valutazione dello stato dell'ambiente acustico, in relazione ai molteplici aspetti coinvolti, dagli effetti indotti sulla salute alla definizione dell'efficacia delle azioni intraprese.

Le informazioni relative a tali aspetti svolgeranno un ruolo importante nei prossimi anni in quanto in grado di rispondere alle richieste relative alle elaborazioni di mappature acustiche e nella produzione dei dati richiesti dalla Direttiva comunitaria relativa alla determinazione e gestione del rumore ambientale.

## GESTIONE E CONSULTAZIONE DEL SISTEMA INFORMATIVO

La banca dati permette ai referenti delle Agenzie Ambientali Regionali e provinciali di inserire e aggiornare le informazioni sul rumore riguardanti la propria regione.

I referenti regionali verificano inoltre, che i dati immessi siano corretti e osservino il rispetto di un protocollo condiviso tra l'Agenzia nazionale e quelle locali, durante l'operazione di invio delle informazioni vengono effettuati automaticamente altri controlli sull'attendibilità e la validità del dato.

L' APAT gestisce il servizio a livello nazionale, ne garantisce il corretto funzionamento, propone e realizza le nuove implementazioni, gli aggiornamenti e la produzione di reports periodici. Attualmente l'osservatorio Rumore è un'area riservata alla quale possono accedere esclusivamente i referenti regionali delle ARPA/APPA e quelli nazionali dell'APAT.

E' previsto lo sviluppo di nuove implementazioni per utente generico che permettano elaborazioni di dati sulla base degli indicatori ambientali di cause primarie, impatto e risposta così da ottenere una immediata lettura del contenuto della banca dati anche ad un pubblico non esperto. (vedi Figura 3)

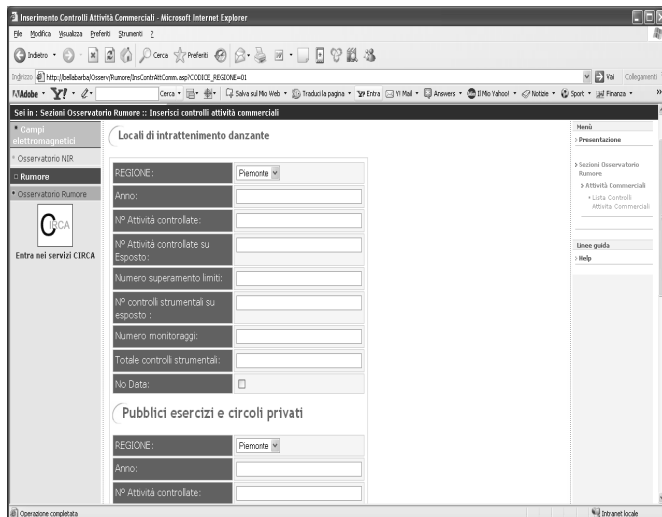


Figura 3. Schermata della struttura delle informazioni disponibili relative alla tipologia di sorgente considerata

## CONCLUSIONI

L'Agenzia per la Protezione dell'ambiente e per i Servizi Tecnici ed il sistema Agenziale ARPA/APPA stanno lavorando alla realizzazione dell'Osservatorio Nazionale sul Rumore, una banca dati con una architettura di indicatori ed informazioni capaci di analizzare e descrivere la situazione nazionale in materia di inquinamento acustico. La struttura di gestione e comunicazione di dati ambientali risponde alle esigenze di una corretta, obiettiva, puntuale ed aggiornata conoscenza delle informazioni in materia di inquinamento acustico. La Banca Dati appartiene al sistema informativo dell'APAT ed è organizzata attraverso la codifica DPSIR (Determinanti – Pressioni – Stato – Impatti – Risposte), consentendo differenti livelli di lettura e di utilizzo. L'architettura delle informazioni, distinte per sezioni dedicate alle tipologie di sorgente (attività, infrastrutture), alla normativa, alla dotazione ed agli strumenti di pianificazione acustica permette l'elaborazione dei dati destinata a differenti fruizioni. Il popolamento delle sezioni potrà consentire una analisi delle principali tematiche in materia di inquinamento acustico a livello nazionale, con dati disaggregati per regione, evidenziando una lettura delle differenze e delle distinzioni nelle diverse realtà territoriali, riguardante sia le caratteristiche e le situazioni scaturite dalla presenza delle principali sorgenti di rumore, sia lo stato di attuazione della normativa e le modalità di applicazione e lo stato di adozione degli strumenti di pianificazione acustica. Tali informazioni risultano necessarie nella definizione di atti di pianificazione strategica in tema di prevenzione e contenimento dell'inquinamento acustico, da parte dei diversi attori coinvolti, siano essi decisori politici, amministratori, legislatori e cittadini.

Le occasioni di confronto tra le diverse situazioni esistenti configura l'Osservatorio quale luogo di riferimento per l'acquisizione delle informazioni e le conseguenti possibilità di condivisione dei problemi. Nel futuro sarà privilegiato l'accesso dei dati al pubblico, avviando una maggiore consapevolezza dello stato acustico dell'ambiente nel quale si vive, implementando le informazioni relative agli aspetti normativi ed alla progettazione ed attuazione di progetti pilota in tema di risanamento acustico.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. D.Lgs 19 agosto 2005, n.195, in attuazione della Direttiva 2003/4/CE “*sull’accesso del pubblico all’informazione ambientale*”
2. D. Lgs. 19 agosto 2005, n.194, “*Attuazione della direttiva 2002/49/CE relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale*”. G.U. n. 124 del 30/05/06
3. Direttiva 2002/49/CE del 25/06/02 sulla determinazione e gestione del rumore ambientale, G.U.C.E. 18/07/02
4. Legge Quadro sull’inquinamento acustico 26 ottobre 1995, n. 447, G.U. n.254 del 30.05.95. Suppl. Ord. n.125.
5. Documento AGF-T-RAP-03-13 “Supporto ad APAT per l’adeguamento/aggiornamento degli Osservatori ambientali per le tematiche Radiazioni ionizzanti, Radiazioni non ionizzanti, Rumore”.
6. Annuario dei Dati Ambientali APAT, 2005 2006
7. CTN- AGF Indicazioni operative per la costruzione dell’indicatore popolazione esposta al rumore in riferimento alla Direttiva 2002/49/CE, APAT - Centro Tematico Nazionale Agenti Fisici, 2004.
8. Brambilla G., Poggi A., Indicazioni operative per la costruzione dell’indicatore “Popolazione esposta al rumore” in riferimento alla Direttiva 2002/49/CE, CTN\_AGF, Bologna 18 gennaio 2005.

## **VALUTAZIONE DELL'INQUINAMENTO ACUSTICO IN AREE URBANE IN PRESENZA DI INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO**

Massimo Coppi, G. Moncada Lo Giudice, Andrea Venditti

Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana n° 18, Roma

### **SOMMARIO**

Nella presente nota, viene eseguita, sulla base dell'analisi della normativa nazionale relativamente alla pianificazione acustica, una valutazione del livello di pressione sonora che potrebbe essere effettivamente presente nelle aree urbane in presenza delle infrastrutture di trasporto.

### **PREMESSA**

Nelle aree urbane, la presenza di molteplici sorgenti sonore, determina significativi livelli di inquinamento acustico. Da recenti statistiche è emerso che, per le popolazioni urbane, la maggior fonte di rumore è costituita dal traffico stradale, poi, a seconda delle varie situazioni locali vengono indicate altre fonti inquinanti quali aeroporti, ferrovie o particolari complessi industriali posti in prossimità di aree urbanizzate.

La normativa nazionale disciplina le varie fonti inquinanti attraverso l'introduzione di limiti esterni. Relativamente alle infrastrutture di trasporto vengono introdotte specifiche aree di rispetto all'interno delle quali sono stabiliti i vari limiti da rispettare.

La Normativa nazionale prevede, all'interno delle fasce di pertinenza, una valutazione separata dei livelli immessi dall'infrastruttura rispetto a quelli delle altre sorgenti fisse. Se da un lato ciò consente, in caso di superamento di tali limiti, interventi di mitigazione acustica "mirati", dall'altro tale approccio non tiene conto dell'effettivo livello globale di inquinamento acustico cui è soggetta la popolazione esposta. Infatti, sui ricettori presenti nelle varie fasce di pertinenza, gli effettivi livelli di rumore presenti sono determinati da tutte le sorgenti presenti e nella prospettiva di una tutela sanitaria della popolazione esposta, occorre considerare proprio tali livelli globali.

Pertanto, la sovrapposizione del rumore prodotto dalle varie infrastrutture a quello dovuto alle altre fonti inquinanti, può determinare sia il superamento dei limiti di attenzione, sia, in alcuni casi, il superamento del limite sanitario di 70 dBA, nonostante le sorgenti rispettino singolarmente i dettami legislativi.

D'altronde le autorità comunali hanno il compito della tutela della salute della popolazione esposta e la

determinazione dei livelli globali presenti, risulta indispensabile se si vuole valutare l'effettivo disturbo e quindi predisporre gli interventi di tutela.

Nella memoria viene eseguita, sulla base delle disposizioni legislative, una valutazione del livello di rumore effettivamente presente nelle aree urbane in presenza delle infrastrutture di trasporto. Sulla scorta di tale disamina vengono evidenziate alcune carenze legislative in merito alla tutela della popolazione esposta.

### **LA PIANIFICAZIONE ACUSTICA DEI TERRITORI IN PRESENZA DI INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO**

La Legge quadro sull'inquinamento acustico (447/95), conferisce ai Comuni la competenza della classificazione in zone acustiche del proprio territorio secondo i criteri stabiliti da specifiche leggi regionali.

La classificazione del territorio comunale viene eseguita suddividendo il territorio in sei classi acustiche omogenee con caratteristiche di rumorosità crescenti. Si passa dalla Classe I (aree particolarmente protette) alla Classe VI (aree esclusivamente industriali), all'interno delle quali vigono dei valori limite assoluti determinati con riferimento al livello equivalente continuo ponderato in curva "A". tali valori vengono riferiti a due periodi temporali:

- periodo di riferimento diurno (D) 06:00 – 22:00;
- periodo di riferimento notturno (N) 22:00 – 06:00.

Le varie classi acustiche, si riferiscono ad aree con specifiche destinazioni d'uso e caratterizzate dalla presenza o meno di infrastrutture di trasporto particolarmente rumorose.

Le caratteristiche territoriali delle varie classi acustiche sono riportate nella tabella A all'allegata al D.P.C.M. 14/11/1997 (vedi tabella 1).

Tabella 1 – Classificazione del territorio comunale

CLASSE I - <i>aree particolarmente protette</i> : rientrano in questa classe le aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione: aree ospedaliere, scolastiche, aree destinate al riposo ed allo svago, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, ecc.
CLASSE II - <i>aree destinate ad uso prevalentemente residenziale</i> : rientrano in questa classe le aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali e artigianali
CLASSE III - <i>aree di tipo misto</i> : rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione, con presenza di attività commerciali, uffici, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici
CLASSE IV - <i>aree di intensa attività umana</i> : rientrano in questa classe le aree urbane interessate da intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali e uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali, le aree con limitata presenza di piccole industrie.
CLASSE V - <i>aree prevalentemente industriali</i> : rientrano in questa classe le aree interessate da insediamenti industriali e con scarsità di abitazioni.
CLASSE VI - <i>aree esclusivamente industriali</i> : rientrano in questa classe le aree esclusivamente interessate da attività industriali e prive di insediamenti abitativi

Si noti come, a parità di caratteristiche urbanistiche, la presenza di infrastrutture di trasporto (ferrovie, strade di grande comunicazione, le arterie stradali con un traffico orario superiore ai 500 veicoli) determina l’assegnazione della classe acustica.

Per quanto attiene i valori limite assoluti riguardanti le varie classi acustiche questi sono suddivisi in:

- *valori limite di emissione;*
- *valori limite assoluti di immissione;*
- *valori di attenzione;*
- *valori di qualità.*

I livelli di rumore riguardanti i valori limite di emissione, immissione e di qualità sono riportati rispettivamente nelle tabelle B, C e D, allegata al D.P.C.M. 14/11/1997 (vedi tabella 2).

Tabella 2 – Valori limite

DPCM 14.11.1997						
Classi di destinazione d'uso del territorio	VE		VI		VQ	
	D	N	D	N	D	N
	I - <i>aree particolarmente protette</i>	45	35	50	40	47
II - <i>aree prevalentemente residenziali</i>	50	40	55	45	52	42
III - <i>aree di tipo misto</i>	55	45	60	50	57	47
IV - <i>aree di intensa attività umana</i>	60	50	65	55	62	52
V - <i>aree prevalentemente industriali</i>	65	55	70	60	67	57
VI - <i>aree esclusivamente industriali</i>	65	65	70	70	70	70

VE = valori limite di emissione;

VI = valori limite assoluti di immissione;

VQ = valori di qualità.

Per quanto attiene i valori di attenzione, questi sono definiti come “valore di rumore che segnala la presenza di un potenziale rischio per la salute umana o per l’ambiente”. Tali valori sono, se relativi ai tempi di riferimento pari ai valori limite assoluti di immissione, mentre se riferiti ad un’ora pari ai valori limite assoluti di immissione, aumentati di 10 dBA per il periodo diurno e di 5 dBA per il periodo notturno.

Se ricorrono una delle condizioni sopra riportate, ossia se vengono superati i valori limite di attenzione, si è in presenza

di un potenziale rischio per la salute umana o per l’ambiente e pertanto vanno predisposti i piani di risanamento.

Va sottolineato che, tutte le prescrizioni sui valori limite fin qui illustrate, si riferiscono alle sorgenti fisse ad esclusione delle infrastrutture di trasporto nelle aree interne alle loro fasce di pertinenza. All’esterno di tali fasce, le infrastrutture di trasporto concorrono al raggiungimento dei limiti di immissione.

Relativamente alle *infrastrutture di trasporto ferroviario*, il DPR 18/11/98 n. 459, regola le norme in materia di inquinamento acustico derivante da tali infrastrutture. Le disposizioni del decreto si applicano alle infrastrutture esistenti ed a quelle di nuova realizzazione.

Il Decreto prevede che a partire dalla mezzera dei binari, vengono istituite delle fasce territoriali di pertinenza dell’infrastruttura all’interno delle quali valgono, per il rumore ferroviario, specifici limiti di immissione.

Per le infrastrutture esistenti e di nuova realizzazione con velocità di progetto non superiore a 200 km/h la fascia di rispetto è pari a 250 m suddivisa in due parti: la prima più vicina all’infrastruttura della larghezza di 100 m denominata fascia A; la seconda più distante dall’infrastruttura della larghezza di 150 m, denominata fascia B.

Per le infrastrutture con velocità di progetto superiore a 200 km/h, la larghezza della fascia di pertinenza è pari a 250 m. Per le infrastrutture di nuova realizzazione in presenza di ricettori di prima classe (scuole, ospedali, case di cura, case di riposo) lo studio può essere esteso fino a 500 m per lato.

Le ampiezze delle fasce di pertinenza con i relativi valori limite di immissione, previsti per le infrastrutture ferroviarie, sono riportati nella tabella 3.

Tabella 3 – Fasce di pertinenza e valori limite di immissione per le infrastrutture ferroviarie

FERROVIA	FASCIA DI PERTINENZA	TUTTI I RICETTORI $L_{eq}$ [dB(A)]		RICETTORI DI CLASSE I $L_{eq}$ [dB(A)]	
		Diurno 06-22	Notturno 22-06	Diurno 06-22	Notturno 22-06
Nuova realizzazione velocità di progetto > 200 km/h	250 m	65	55	50	40
Esistente e di nuova realizzazione velocità di progetto < 200 km/h	Fascia A 100 m	70	60	50	40
	Fascia B 150 m	65	55		

Per quanto attiene le *infrastrutture di trasporto stradale*, il Decreto del Presidente della Repubblica “Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell’inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare” del 30 marzo 2004, n. 142, previsto dall’art. 11 della Legge Quadro 447/95, regola le norme in materia di inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare. Tale provvedimento ha la finalità di fissare i valori limite assoluti di immissione relativi alle infrastrutture dei trasporti stradali all’interno delle rispettive fasce di pertinenza, nonché la relativa estensione delle stesse.

Le strade sono classificate, riguardo alle loro caratteristiche costruttive, tecniche e funzionali, nei seguenti tipi:

- A - Autostrade;
- B - Strade extraurbane principali;
- C - Strade extraurbane secondarie;
- D - Strade urbane di scorrimento;

E - Strade urbane di quartiere;

F - Strade locali.

In funzione di tale classificazione, nella tabella 4 per le strade di nuova realizzazione e nella tabella 5 per le strade esistenti, sono definite le ampiezze delle fasce di pertinenza con i relativi limiti di immissione.

Tabella 4 – Fasce di pertinenza e valori limite di immissione per le strade di nuova realizzazione

TIPO DI STRADA (secondo codice della strada)	SOTTOTIPI A FINI ACUSTICI (secondo D.M. 5.11.01 - Norme funz. e geom. Per la costruzione delle strade)	Ampiezza fascia di pertinenza acustica (m)	Scuole*, ospedali, case di cura e di riposo		Altri Ricettori	
			Diurno dB(A)	Notturno dB(A)	Diurno dB(A)	Notturno dB(A)
A - autostrada		250	50	40	65	55
B - extraurbana principale		250	50	40	65	55
C - extraurbana secondaria	C 1	250	50	40	65	55
	C 2	150	50	40	65	55
D - urbana di scorrimento		100	50	40	65	55
E - urbana di quartiere		30	definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in tabella C allegata al D.P.C.M. in data 14 novembre 1997 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane, come prevista dall'art. 6, comma 1, lettera a), della legge n. 447 del 1995.			
F - locale		30	definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in tabella C allegata al D.P.C.M. in data 14 novembre 1997 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane, come prevista dall'art. 6, comma 1, lettera a), della legge n. 447 del 1995.			

\* per le scuole vale il solo limite diurno

Tabella 5 – Fasce di pertinenza e valori limite di immissione per le strade esistenti o assimilabili

TIPO DI STRADA (secondo codice della strada)	SOTTOTIPI A FINI ACUSTICI (secondo Norme CNR 1950 e direttive PUT)	Ampiezza fascia di pertinenza acustica (m)	Scuole*, ospedali, case di cura e di riposo		Altri Ricettori	
			Diurno dB(A)	Notturno dB(A)	Diurno dB(A)	Notturno dB(A)
A - autostrada		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
B - extraurbana principale		100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
C - extraurbana secondaria	Ca (strade a carreggiate separate e tipo IV CNR 1980)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
	Cb (tutte le altre strade extraurbane secondarie)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		50 (fascia B)			65	55
D - urbana di scorrimento	Da (strade a carreggiate separate e interquartiere)	100	50	40	70	60
	Db (tutte le altre strade urbane di scorrimento)	100	50	40	65	55
E - urbana di quartiere		30	definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in tabella C allegata al D.P.C.M. in data 14 novembre 1997 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane, come prevista dall'art. 6, comma 1, lettera a), della legge n. 447 del 1995.			
F - locale		30	definiti dai Comuni, nel rispetto dei valori riportati in tabella C allegata al D.P.C.M. in data 14 novembre 1997 e comunque in modo conforme alla zonizzazione acustica delle aree urbane, come prevista dall'art. 6, comma 1, lettera a), della legge n. 447 del 1995.			

\* per le scuole vale il solo limite diurno

Infine per quanto riguarda le infrastrutture di trasporto aeroportuale, il Decreto del 31 ottobre 1997 "Metodologia di misura del rumore aeroportuale" disciplina, ai fini del contenimento dell'inquinamento acustico negli aeroporti, i criteri di individuazione delle zone di rispetto per le aree e le attività aeroportuali, nonché quelli che regolano l'attività urbanistica nelle stesse zone.

Per la determinazione delle fasce di rispetto, viene introdotto un nuovo descrittore acustico ( $L_{VA}$  - livello di valutazione del rumore aeroportuale) riferito al solo rumore aeroportuale relativamente a 21 giorni rappresentativi dell'intero anno. Vengono definiti due periodi di riferimento: il periodo diurno (06:00 - 23:00) e quello notturno (23:00 - 06:00). Va notato che, tali periodi, non coincidono con quelli previsti dalla classificazione acustica Comunale e per le infrastrutture stradali e ferroviarie.

La caratterizzazione acustica dell'intorno aeroportuale è definita dalle seguenti aree di rispetto:

- zona A: in cui l'indice  $L_{VA}$  non può superare il valore di 65 dB(A);
- zona B: in cui l'indice  $L_{VA}$  non può superare il valore di 75 dB(A);
- zona C: in cui l'indice  $L_{VA}$  può superare il valore di 75 dB(A);

al di fuori delle zone A, B e C l'indice  $L_{VA}$  non può superare il valore di 60 dB(A).

Le attività consentite nell'intorno aeroportuale, fatte salve le attività e gli insediamenti esistenti al momento dell'entrata in vigore del Decreto 31/10/1997 sono:

- zona A: non sono previste limitazioni;
- zona B: attività agricole ed allevamenti di bestiame, attività industriali e assimilate, attività commerciali, attività di ufficio, terziario e assimilate, previa adozione di adeguate misure di isolamento acustico;
- zona C: esclusivamente le attività funzionalmente connesse con l'uso ed i servizi delle infrastrutture aeroportuali.

## VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI INQUINAMENTO ACUSTICO

Tenendo conto delle disposizioni normative sopra esposte, la valutazione del livello di inquinamento acustico nelle aree urbane in presenza di infrastrutture di trasporto, deve tener conto delle seguenti prescrizioni:

- Tutte le sorgenti fisse ad eccezione delle infrastrutture di trasporto, debbono rispettare i limiti assoluti stabiliti per le varie zone dal piano di zonizzazione acustica comunale.
- Le infrastrutture di trasporto, all'interno delle rispettive fasce di pertinenza debbono rispettare i limiti stabiliti dalla normativa.
- Al di fuori delle fasce di pertinenza le infrastrutture di trasporto debbono rispettare i limiti relativi alla zona acustica del piano di zonizzazione comunale in modo analogo alle altre sorgenti fisse. Naturalmente presso i ricettori i livelli immessi debbono essere tali, se sommati ai livelli dovuti alle altre fonti inquinanti, da non superare il limite di zona.
- All'interno delle fasce di pertinenza tutte le altre sorgenti fisse debbono rispettare i limiti corrispondenti alla zona acustica comunale corrispondente. In altre parole, i limiti stabiliti per le

infrastrutture di trasporto all'interno delle rispettive fasce di pertinenza riguardano solamente il rumore prodotto dalla stessa infrastruttura.

- All'interno delle fasce di pertinenza delle infrastrutture di trasporto ferroviario e stradale, il livello di rumore indotto dall'infrastruttura sui ricettori sensibili di Classe I debbono rispettare i limiti assoluti previsti dalla tab. B del DPCM 14/11/97 per la stessa Classe I.
- Nel caso di sovrapposizione di più fasce di pertinenza, il livello immesso nell'area in cui si sovrappongono le fasce, non deve superare complessivamente il maggiore fra i valori limite di immissione previsti per le singole infrastrutture (art. 4 D.M. 29/11/2000).

Da quanto sopra esposto, appare evidente come, per i ricettori presenti all'interno delle fasce di rispetto, si possano in ogni caso superare i limiti di attenzione previsti per la classe acustica corrispondente, proprio a causa del contributo dell'infrastruttura. Infatti, considerando che i limiti di attenzione, se riferiti all'intero periodo di riferimento, corrispondono ai livelli di immissione previsti per quella zona, il contributo dell'infrastruttura incrementa certamente tale livello. Ma può verificarsi che, in alcuni casi, il contributo dell'infrastruttura sia tale da superare il limite sanitario di 70 dBA, ritenuto dalla letteratura il limite fisiologico al di sopra del quale si entra nel campo del danno alla salute.

Nelle tabelle seguenti, vengono riportati i livelli globali che possono verificarsi all'interno delle fasce di rispetto delle infrastrutture stradali e ferroviarie qualora vengano rispettati i limiti normativi previsti per l'infrastruttura e quelli previsti per la classe acustica dell'area attraversa. Si noti come, il superamento di 70 dBA possa verificarsi già per i ricettori in classe III presenti all'interno delle fasce di rispetto. Va anche notato che, relativamente ai ricettori sensibili di I classe, per i quali la normativa prevede in modo tassativo che, anche all'interno delle fasce di rispetto siano rispettati gli stessi limiti (50 dBA, 40 dBA) previsti per la classe I, la possibile sovrapposizione del rumore dell'infrastruttura determina comunque un superamento di tali valori. Nelle tabelle  $L_T$  è il livello globale determinato dalla somma energetica dei limiti stabiliti per la classe acustica e per la fascia di pertinenza (livello equivalente continuo ponderato A).

Tabella 6 – Verifica superamento limiti di attenzione e limite sanitario di 70 dBA per le infrastrutture ferroviarie

CLASSI ACUSTICHE	FERROVIA			
	Esistenti e velocità di prog. < 200km/h			
	FASCIA A 100 m		FASCIA B 150 m	
	D 6-22	N 22-6	D 6-22	N 22-6
I	50+50 $L_T = 53$	40+40 $L_T = 43$	50+50 $L_T = 53$	40+40 $L_T = 43$
II	55+70 $L_T = 70$	45+60 $L_T = 60$	55+65 $L_T = 65,5$	45+55 $L_T = 55,5$
III	60+70 $L_T = 70,5$	50+60 $L_T = 60,5$	60+65 $L_T = 66$	50+55 $L_T = 56$
IV	65+70 $L_T = 71$	55+60 $L_T = 61$	65+65 $L_T = 68$	55+55 $L_T = 58$
V	70+70 $L_T = 73$	60+60 $L_T = 63$	70+65 $L_T = 71$	60+55 $L_T = 61$
VI	70+70 $L_T = 73$	70+60 $L_T = 70,5$	70+65 $L_T = 71$	70+55 $L_T = 70$

Tabella 7 – Verifica superamento limiti di attenzione e limite sanitario di 70 dBA per le infrastrutture ferroviarie

CLASSI ACUSTICHE	FERROVIA	
	Nuova con velocità di prog. > 200km/h	
	FASCIA 250 m	
	D 6-22	N 22-6
I	50+50 $L_T = 53$	40+40 $L_T = 43$
II	55+65 $L_T = 65,5$	45+55 $L_T = 55,5$
III	60+65 $L_T = 66$	50+55 $L_T = 56$
IV	65+65 $L_T = 68$	55+55 $L_T = 58$
V	70+65 $L_T = 71$	60+55 $L_T = 61$
VI	70+65 $L_T = 71$	70+55 $L_T = 70$

Tabella 8 – Verifica superamento limiti di attenzione e limite sanitario 70 dBA per le infrastrutture stradali (Tip. A, B, Ca)

CLASSI ACUSTICHE	STRADE			
	Tipologia A – autostrade			
	Tipologia B – extraurbana principale		Tipologia C – extraurbana secondaria Ca	
	FASCIA A 100 m		FASCIA B 150 m	
	D 6-22	N 22-6	D 6-22	N 22-6
I	50+50 $L_T = 53$	40+40 $L_T = 43$	50+50 $L_T = 53$	40+40 $L_T = 43$
II	55+70 $L_T = 70$	45+60 $L_T = 60$	55+65 $L_T = 65,5$	45+55 $L_T = 55,5$
III	60+70 $L_T = 70,5$	50+60 $L_T = 60,5$	60+65 $L_T = 66$	50+55 $L_T = 56$
IV	65+70 $L_T = 71$	55+60 $L_T = 61$	65+65 $L_T = 68$	55+55 $L_T = 58$
V	70+70 $L_T = 73$	60+60 $L_T = 63$	70+65 $L_T = 71$	60+55 $L_T = 61$
VI	70+70 $L_T = 73$	70+60 $L_T = 70,5$	70+65 $L_T = 71$	70+55 $L_T = 70$

Tabella 9 – Verifica superamento limiti di attenzione e limite sanitario di 70 dBA per le infrastrutture stradali (Tip. Cb)

CLASSI ACUSTICHE	STRADE			
	Tipologia C – extraurbana secondaria Cb			
	FASCIA A 100 m		FASCIA B 50 m	
	D 6-22	N 22-6	D 6-22	N 22-6
I	50+50 $L_T = 53$	40+40 $L_T = 43$	50+50 $L_T = 53$	40+40 $L_T = 43$
II	55+70 $L_T = 70$	45+60 $L_T = 60$	55+65 $L_T = 65,5$	45+55 $L_T = 55,5$
III	60+70 $L_T = 70,5$	50+60 $L_T = 60,5$	60+65 $L_T = 66$	50+55 $L_T = 56$
IV	65+70 $L_T = 71$	55+60 $L_T = 61$	65+65 $L_T = 68$	55+55 $L_T = 58$
V	70+70 $L_T = 73$	60+60 $L_T = 63$	70+65 $L_T = 71$	60+55 $L_T = 61$
VI	70+70 $L_T = 73$	70+60 $L_T = 70,5$	70+65 $L_T = 71$	70+55 $L_T = 70$

Tabella 10 – Verifica superamento limiti di attenzione e limite sanitario di 70 dBA per le infrastrutture stradali (Tip. Da)

CLASSI ACUSTICHE	STRADE	
	Tipologia D – urbana di scorrimento Da	
	FASCIA 100 m	
	D 6-22	N 22-6
I	50+50 L <sub>T</sub> = 53	40+40 L <sub>T</sub> = 43
II	55+70 L <sub>T</sub> = 70	45+60 L <sub>T</sub> = 60
III	60+70 L <sub>T</sub> = 70,5	50+60 L <sub>T</sub> = 60,5
IV	65+70 L <sub>T</sub> = 71	55+60 L <sub>T</sub> = 61
V	70+70 L <sub>T</sub> = 73	60+60 L <sub>T</sub> = 63
VI	70+70 L <sub>T</sub> = 73	70+60 L <sub>T</sub> = 70,5

Tabella 11 – Verifica superamento limiti di attenzione e limite sanitario di 70 dBA per le infrastrutture stradali (Tip. Db)

CLASSI ACUSTICHE	STRADE	
	Tipologia D – urbana di scorrimento Db	
	FASCIA 100 m	
	D 6-22	N 22-6
I	50+50 L <sub>T</sub> = 53	40+40 L <sub>T</sub> = 43
II	55+65 L <sub>T</sub> = 65,5	45+55 L <sub>T</sub> = 55,5
III	60+65 L <sub>T</sub> = 66	50+55 L <sub>T</sub> = 56
IV	65+65 L <sub>T</sub> = 68	55+55 L <sub>T</sub> = 58
V	70+65 L <sub>T</sub> = 71	60+55 L <sub>T</sub> = 61
VI	70+65 L <sub>T</sub> = 71	70+55 L <sub>T</sub> = 70

Per quanto riguarda le infrastrutture aeroportuali, considerando la diversa durata dei periodi di riferimento rispetto ai casi precedenti (06:00 – 23:00 periodo diurno, 23:00 – 06:00 periodo notturno) i valori del livello equivalente continuo globale rispetto ai periodi di riferimento tradizionali può determinarsi con le seguenti espressioni:

per il periodo diurno:

$$L_{eqd} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N_d} 10^{\frac{SEL_i}{10}} - \sum_{k=1}^{N_{22}} 10^{\frac{SEL_k}{10}} + T_d \cdot 10^{\frac{L_d}{10}}}{T_d} \right] \quad (1)$$

Dove:

- T<sub>d</sub> è il tempo di riferimento diurno (6-22);
- N<sub>d</sub> è il numero totale dei movimenti degli aeromobili del periodo diurno aeroportuale (6-23);
- N<sub>22</sub> è il numero di movimenti degli aeromobili nel periodo (22-23);
- L<sub>d</sub> è il livello equivalente continuo nel periodo di riferimento diurno (6-22) in assenza del rumore prodotto dagli aeromobili.

Sviluppando la (1) si ottiene:

$$L_{eqd} = 10 \log_{10} \left[ \frac{17}{16} \cdot 10^{\frac{L_{VAAd}}{10}} - \frac{1}{16} \cdot 10^{\frac{L_{VA22}}{10}} + 10^{\frac{L_d}{10}} \right] \quad (2)$$

In cui:

- L<sub>VAAd</sub> è il livello di valutazione del rumore aeroportuale nel periodo diurno aeroportuale (6-23);
- L<sub>VA22</sub> è il livello di valutazione del rumore aeroportuale nel periodo (22-23).

Per il periodo notturno:

$$L_{eqn} = 10 \log_{10} \left[ \frac{10 \cdot \sum_{i=1}^{N_n} 10^{\frac{SEL_i}{10}} + \sum_{k=1}^{N_{22}} 10^{\frac{SEL_k}{10}} + T_n \cdot 10^{\frac{L_n}{10}}}{T_n} \right] \quad (3)$$

Dove:

- T<sub>n</sub> è il tempo di riferimento notturno (22-6);
- N<sub>n</sub> è il numero totale dei movimenti degli aeromobili del periodo notturno aeroportuale (23-6);
- N<sub>22</sub> è il numero di movimenti degli aeromobili nel periodo (22-23);
- L<sub>n</sub> è il livello equivalente continuo nel periodo di riferimento notturno (22-6) in assenza del rumore prodotto dagli aeromobili.

Sviluppando la (3) si ottiene:

$$L_{eqn} = 10 \log_{10} \left[ \frac{7}{8} \cdot 10^{\frac{L_{VAAn}}{10}} + \frac{1}{8} \cdot 10^{\frac{L_{VA22}}{10}} + 10^{\frac{L_n}{10}} \right] \quad (4)$$

In cui:

- L<sub>VAAn</sub> è il livello di valutazione del rumore aeroportuale nel periodo notturno aeroportuale (23-6);
- L<sub>VA22</sub> è il livello di valutazione del rumore aeroportuale nel periodo (22-23).

Anche in questo caso possono verificarsi superamenti dei limiti di attenzione sia all'interno delle fasce di rispetto sia al di fuori di tale fasce dove l'infrastruttura deve limitare l'indice L<sub>VA</sub> ad un valore inferiore ai 60 dBA.

Nella figura 1 viene riportato, per esempio, l'andamento delle curve limite per vari valori di Leq al di sotto delle quali la sovrapposizione tra il rumore aeroportuale (L<sub>VAAd</sub>) ed il rumore dovuto ad altre fonti (L<sub>d</sub>) consentono il rispetto di tale valore. Si noti come per rispettare nella zona aeroportuale A un livello globale di 65 dBA, in presenza di un rumore di fondo superiore ai 55 dBA, il contributo dovuto al rumore aeroportuale deve essere in realtà inferiore al limite consentito nella stessa zona dal Decreto aeroportuale (punto A in figura 1). Nella zona aeroportuale B, la presenza di livelli di rumore di fondo elevati può determinare, anche per valori di L<sub>VAAd</sub> contenuti entro i limiti, un superamento del limite di 70 dBA (punto B in figura 1).

Nella figura 2 vengono riportate le curve limite relativamente alle varie classi acustiche dove il valore di L<sub>VAAd</sub> deve essere inferiore a 60.

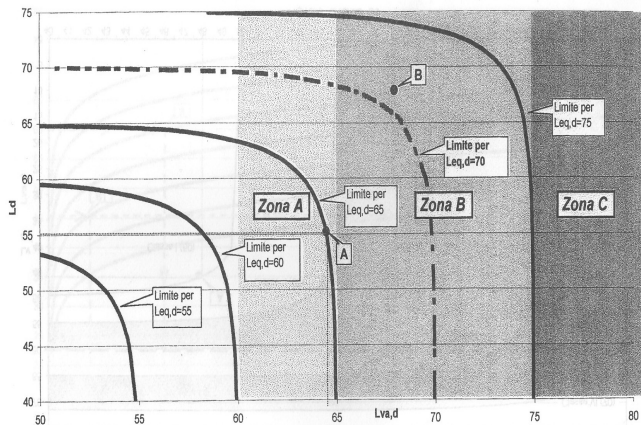


Figura 1 – Andamento curve limite di  $L_{eq,d}$

Si noti che, al fine di rispettare i limiti di zona, i valori di  $L_d$  e  $L_{VAd}$  devono essere compresi all'interno delle aree relative alle singole classi. Per rispettare, ad esempio, i limiti previsti dalla prima classe, i valori di  $L_d$  e  $L_{VAd}$  debbono essere compresi nell'area racchiusa dalla prima curva a sinistra ed in particolare l' $L_{VAd}$  non può assumere il limite di 60 dBA: esso deve essere necessariamente inferiore a 49 dBA. Se per esempio (punto A in figura 2), si è in presenza di un  $L_d$  pari a 48 dBA il valore dell' $L_{VAd}$  non può superare i 46 dBA.

Si noti come il limite di  $L_{VAd} = 60$  dBA (linea orizzontale tratteggiata in figura 2) è accettabile solamente per le classi acustiche IV, V e VI; per la classe III è accettabile solo in presenza di un rumore di fondo inferiore a 40 dBA.

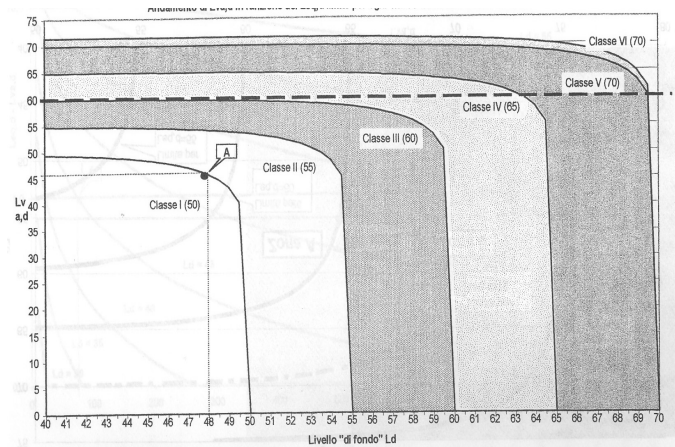


Figura 2 – Andamento curve limite relative alle classi acustiche

## CONCLUSIONI

Da un'analisi delle disposizioni normative relative alle aree urbanizzate in presenza di infrastrutture di trasporto, è emerso che, pur nel rispetto dei limiti normativi previsti per le singole fonti di rumore, la presenza dell'infrastruttura può determinare sia il superamento dei limiti di attenzione sia il superamento del limite sanitario di 70 dBA.

Nella prospettiva della tutela sanitaria della popolazione esposta tale incongruenza impone un'attenta revisione delle disposizioni normative.

## BIBLIOGRAFIA

1. Legge 26 ottobre 1995, n° 447 – *Legge quadro sull'inquinamento acustico*;
2. D.M. 31 ottobre 1997 – *Metodologia di Misura del Rumore Aeroportuale*;
3. D.P.C.M. 14 novembre 1997 – *Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore*;
4. D.P.R. 18 novembre 1998, n° 459 – *Regolamento recante norme di esecuzione dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n. 447, in materia di inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario*;
5. 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*;
6. D.P.R. 30 marzo 2004, n° 142 – *Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell'inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare, a norma dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n. 447*;
7. M. Coppi, A. Guglielmo, S. Relandini – *Pianificazione acustica del territorio negli intorni aeroportuali* – Edizioni ESAGRAFICA S.r.l. – ottobre 2001.

## LA VALUTAZIONE DELLA POPOLAZIONE ESPOSTA AL RUMORE: METODOLOGIE E APPLICAZIONI NELLA REGIONE UMBRIA

Francesco Asdrubali<sup>1</sup>, Luca Frezzini<sup>1</sup>, Giancarlo Marchetti<sup>2</sup>, Monica Angelucci<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università di Perugia, via G. Duranti 67, 06125 Perugia

<sup>2</sup> Arpa Umbria, Via Pievaiola – Loc. S. Sisto 06132 Perugia

### SOMMARIO

La popolazione esposta al rumore è uno degli indicatori per la descrizione dell'inquinamento acustico che l'O.M.S. ha compreso nell'elenco degli "European Community Health Indicators". La Direttiva 2002/49/CE riguardante la gestione del rumore ambientale, recepita nel nostro Paese con il recente D.L. n.194 del 19/8/2005 prescrive agli Stati membri una indagine oggettiva sullo stato di esposizione al rumore della popolazione, attraverso metodologie ben definite per rendere i risultati omogenei e confrontabili. In Umbria, prima del 2005, gli unici studi su tali tematiche risalivano al biennio 1995-1996, svolti nell'ambito dei Piani Comunali di Risanamento Acustico (Comune di Perugia). Per popolare questo indicatore con dati aggiornati, il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Arpa Umbria hanno avviato nel 2005 una ricerca finalizzata alla valutazione della popolazione esposta nel territorio umbro, limitando l'analisi a particolari casi di studio. Il progetto, articolatosi in fasi successive, ha permesso la messa a punto e la taratura delle metodologie indicate dal WG-AEN CTN\_AGF, ricorrendo ai nuovi descrittori strategici europei ed alla mappatura acustica mediante simulatori di area vasta. Il presente lavoro completa il quadro conoscitivo in materia e conclude l'ultima fase prevista dalla Ricerca, pervenendo agli esiti finali dell'indagine sulla popolazione esposta ad inquinamento acustico della SR 147\_DIR sita nel Comune di Assisi e rappresentativa di uno degli assi turistici maggiormente transitati nella Regione Umbria.

### 1. INTRODUZIONE

Le problematiche emergenti legate all'inquinamento acustico hanno sensibilizzato il legislatore europeo all'emanazione della direttiva sulla gestione del rumore ambientale (Direttiva 2002/49/CE) [1], con la quale il Parlamento e il Consiglio dell'U.E. hanno voluto attuare una politica volta a conseguire un elevato livello di tutela della salute e dell'ambiente.

Il decreto legislativo n. 194/2005 [2], entrato in vigore in data 8 ottobre 2005, recepisce le disposizioni della Direttiva 2002/49/CE, operando nel contempo il riordino ed il coordinamento delle vigenti disposizioni in materia di tutela dell'ambiente abitativo e dell'ambiente esterno dall'inquinamento acustico.

Un importante descrittore per l'inquinamento acustico introdotto dalla direttiva 2002/49/CE è la "quota di popolazione esposta" all'inquinamento acustico, da intendere come il numero di persone che risiedono nelle abitazioni esposte a predeterminati livelli di rumore.

L'indicatore popolazione esposta al rumore è anche inserito all'interno del modulo State nel modello di conoscenza ambientale D.P.S.I.R.[3]. L'O.M.S. ha collocato tale indicatore nell'elenco degli "European Community Health Indicators" [4]. Tale indicatore compare, tra l'altro, tra i sette indicatori individuati dal sistema agenziale APAT/ARPA/APPA, come prioritari ai fini della raccolta di informazioni per la descrizione dell'inquinamento acustico secondo il modello DPSIR.

Le metodologie per la valutazione di tale indicatore, non essendo ancora completamente standardizzate, non consentono la perfetta comparabilità dei dati che, pertanto, hanno un carattere indicativo; il percorso metodologico per il popolamento di questo indicatore è oggetto di una specifica

attività da parte dell'APAT, in collaborazione con il sistema delle Agenzie ed il Centro Tematico Nazionale Agenti Fisici (CTN\_AGF) [5].

Nella legislazione italiana la popolazione esposta al rumore è richiamata, più o meno direttamente, nelle seguenti normative:

- Legge Quadro 447/95 sull'inquinamento acustico [6].
- DM 29/11/00 Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto e delle relative infrastrutture, dei piani e degli interventi di contenimento ed abbattimento del rumore [7].

Il numero delle persone interessate da elevati livelli di rumorosità è infatti uno dei parametri che intervengono nella definizione del grado di priorità degli interventi di risanamento condotti nell'ambito dei piani comunali di risanamento acustico e dei piani di contenimento e abbattimento del rumore, predisposti dai Gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture.

### 2. LA SITUAZIONE EUROPEA E NAZIONALE

La Direttiva 2002/49/CE ha imposto agli Stati membri di raccogliere informazioni sullo stato di esposizione al rumore della popolazione attraverso metodologie condivise, al fine di rendere i risultati omogenei e confrontabili tra loro.

Le informazioni e i dati ad oggi disponibili, frutto di campagne di misura svolte con diverse finalità, non rispondono ai criteri e metodi introdotti dalla direttiva. In Italia l'attuale livello di conoscenza circa la quantificazione dell'indicatore è insoddisfacente. L'entità del problema non è identificabile su vasta scala territoriale, poiché l'assenza di un preciso input normativo nazionale sull'argomento ha fatto sì che i pochi dati

raccolti non siano confrontabili, in quanto frutto di iniziative locali, prive quindi di omogeneità metodologica.

Una prima importante raccolta di dati relativi all'esposizione al rumore della popolazione è stata condotta da APAT, in collaborazione con il sistema delle Agenzie e con il CTN\_AGF, a partire dal 2001.

La principale fonte informativa su scala nazionale è l'Annuario dei dati ambientali APAT [8]. I dati riportati in tale pubblicazione hanno un carattere puramente indicativo, in quanto derivanti dall'applicazione di tecniche di analisi e rilevazione disomogenee e non sono perfettamente confrontabili tra loro. Il dato generale che può comunque essere dedotto è quello che una quota significativa della popolazione risulta esposta a livelli superiori a quelli di riferimento.

In generale, da quanto emerge dagli ultimi dati pubblicati da APAT nel 2005 (relativi all'anno 2004), risulta che, sebbene l'indicatore abbia grossa rilevanza nel descrivere lo stato dell'ambiente dal punto di vista dell'inquinamento acustico, la copertura spaziale (44 Comuni su 8101) risulta non ancora sufficiente e quella temporale (anni 1991-2003) inadeguata, come pure l'accuratezza, per la limitata confrontabilità dei dati. I dati nazionali relativi ad aree urbane sull'esposizione a livelli superiori a 65 dB(A), pari al 26%, sono confrontabili con le stime elaborate su scala europea [9].

Stime effettuate dall'European Environmental Agency, relative al territorio comunitario collocano intorno al il 32% la percentuale della popolazione della UE (120 milioni di persone) esposta a livelli di rumore causato da traffico stradale maggiore di 55  $L_{dn}$  dB(A) (fig.1), mentre intorno al 10 % (37 milioni), quella esposta al rumore generato da infrastrutture ferroviarie, in base a stime sui dati fornite da Francia, Germania e Paesi Bassi [10].

Poiché i livelli di rumore relativi alle maggiori reti stradali europee sono stimati in continua crescita, così come i tassi di traffico, con speciale riguardo al trasporto merci (Environmental European Agency – EEA), si prevede che l'esposizione della popolazione non possa diminuire in futuro in maniera significativa.

## 2.1 Sviluppo di metodologie di stima in ambito comunitario ed europeo

Il gruppo di lavoro (Working Group) della Commissione Europea sulle problematiche della stima dell'esposizione al rumore, WG-AEN - “*Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure*”[11], ha elaborato una serie di linee guida per supportare gli Stati membri nell'elaborazione di mappature acustiche e nella produzione dei dati richiesti dalla Direttiva 2002/49/CE.

In particolare si sono individuate delle procedure (toolkits), da adottare in base a tipologia e livello di dettaglio dei dati a disposizione dei diversi Paesi, che si differenziano per complessità, accuratezza e costo.

Risale al 2004 il documento “*Indicazioni operative per la costruzione dell'indicatore popolazione esposta al rumore in riferimento alla Direttiva 2002/49/CE*” prodotto dal Centro Tematico Nazionale Agenti Fisici (CTN\_AGF) [11]. Obiettivo dello studio è stato la definizione di procedure univoche e condivise, modulabili sul grado di dettaglio dei dati di livello di esposizione e di popolazione.

Il grado di dettaglio della stima, a seconda che si attui una valutazione su vasta scala o più ristretta, si esprime con un'accuratezza rispettivamente di  $\pm 2-3$  dB o  $\pm 1-2$  dB.

Si stimano i livelli sonori sulle facciate degli edifici e li si associano al numero di persone esposte, con l'attenzione di evitare gradi di accuratezza eccessivamente diversificati tra il calcolo dei livelli sonori e quello della popolazione [12].

Per ciascuna tipologia di sorgente sonora (traffico stradale, ferroviario, aeroportuale, sorgenti fisse) va effettuata un'analisi specifica. I dati demografici devono essere ufficiali, aggiornati e georeferenziati. In Italia l'istituzione preposta è l'ISTAT, che con periodicità decennale conduce il censimento generale della popolazione e delle abitazioni. Fondamentale per la stima dell'esposizione è la georeferenziazione dei dati demografici.

## 3. I CASI DI STUDIO NELLA REGIONE UMBRIA

Gli studi relativi alla popolazione esposta all'inquinamento acustico svolti in Umbria negli ultimi anni sono stati quelli elaborati nell'ambito dei Piani Comunali di Risanamento Acustico; in particolare quello relativo al Comune di Perugia, elaborato dal Laboratorio di Acustica del Dip.to di Ingegneria Industriale, Sezione di Fisica tecnica di Perugia, nel biennio 1995-1996, dal quale è risultato che il 22% della popolazione censita dalla stima era sottoposta ai livelli superiori a 55 dBA notturni [13].

Per popolare questo indicatore il Dip.to di Ingegneria Industriale e Arpa Umbria hanno avviato una ricerca finalizzata alla valutazione della popolazione esposta nel territorio umbro, partendo con l'analisi di particolari casi di studio su scala comunale, recentemente censiti all'interno del Catasto Acustico della Regione Umbria (Comuni di Foligno e Fabriano)[14],[15],[16]. Il lavoro presenta i risultati relativi all'indagine effettuata sul Comune di Assisi, inserito come terzo caso di studio nell'ambito del Catasto acustico, con il quale sono state tarate nuove metodologie di stima in linea con i dettami della Direttiva 2002/49/CE.

Dall'analisi dei lavori e della documentazione presente in letteratura tecnica, è stato scelto quale riferimento principale lo studio compiuto dal Centro Tematico Nazionale Agenti Fisici (CTN\_AGF), “*Indicazioni operative per la costruzione dell'indicatore popolazione esposta al rumore in riferimento alla Direttiva 2002/49/CE*”, pubblicato nel 2004.

Risulta anzitutto evidente che la conoscenza del dato popolazione esposta necessita dell'integrazione di due tipi di informazioni, quali la distribuzione dei livelli sonori e della popolazione residente sul territorio oggetto di studio.

La conoscenza della distribuzione della popolazione residente può essere più o meno dettagliata in funzione della disponibilità degli strumenti informativi (sezioni di censimento, aree residenziali ed edifici in formato digitale vettoriale; georeferenziazione dei numeri civici;...). Pertanto la procedura impiegata è stata modulata sul grado di dettaglio dei dati a disposizione.

Per la realizzazione delle mappe acustiche si è fatto ricorso all'impiego di software previsionali, in considerazione anche della necessità di un rapido e agevole aggiornamento delle mappe, senza per questo sottovalutare l'importanza delle misurazioni, indispensabili, tra l'altro, per procedere alla convalida dei modelli stessi nelle realtà ove sono applicati.

In merito ai modelli numerici, per gli Stati membri che non dispongono di un modello di riferimento nazionale, come l'Italia, la direttiva raccomanda l'impiego del metodo francese NMPB-Routes-96, recepito nella norma francese XPS 31-133, in attesa di un modello europeo in fase di sviluppo nell'ambito del progetto “HARMONOISE” .

### 3.1 Il caso di studio nel Comune di Assisi

Nell'ambito della redazione del Catasto Acustico promosso da ARPA Umbria in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale, a seguito dell'ampliamento dell'indagine su altri 10 comuni Umbri tra i quali Assisi, si è individuata come oggetto del III° caso di studio la strada regionale SR147\_DIR. L'infrastruttura in oggetto risulta di rilevante importanza nell'ambito della rete stradale della Provincia di Perugia in quanto costituisce una via di comunicazione tra due località, S.Maria d. Angeli ed Assisi, molto importanti dal punto di vista turistico. La strada si estende per una lunghezza complessiva di circa 4.430 metri.

L'obiettivo è quello di determinare preliminarmente l'impatto acustico generato dalla strada regionale e stimare conseguentemente l'entità della popolazione esposta a livelli di rumore superiori a quelli di soglia imposti dalla normativa tecnica.

Nell'affrontare l'ultimo caso di studio regionale, il Gruppo di lavoro ha tenuto conto degli esiti ottenuti nei due casi di studio precedenti, indirizzando le metodologie di stima verso una migliore collimazione con le procedure contemplate dalla Direttiva 2002/49/CE e dal Decreto n.194 di recepimento, seguendo dettagliatamente la Procedura 15.2 suggerita nel documento del CTN\_AGF ed escludendo quelle metodologie risultate poco soddisfacenti nei casi precedenti.

I dati di traffico relativi a 7 giorni di misura (5-12 giugno 2006), propedeutici alla caratterizzazione acustica della strada nel simulatore ed effettuati con misuratore radar, hanno evidenziato come la strada sia soggetta a un notevole flusso di traffico veicolare: in totale il radar ha rilevato il passaggio di circa 58.000 veicoli settimanali. La causa principale del fenomeno è da ascrivere alla vocazione principalmente turistico-religiosa dei centri di Assisi e S.Maria degli Angeli.

L'area indagata acusticamente ha un'estensione superficiale complessiva pari a 2,781 kmq.

### 3.2 Simulazioni acustiche della SR 147\_DIR

Fase 1: realizzazione del Digital Ground Model. La prima fase di lavoro ha visto la creazione di un modello digitale del terreno, ottenuto per triangolazioni reiterate a partire dalle informazioni orografiche del sito in esame (curve di livello, punti quotati, carreggiata della SR147\_DIR).

Fase 2: determinazione  $D_{max}$ . Nel caso in esame si è proceduto a due successivi blocchi di simulazioni (mediante i nuovi descrittori  $L_{den}$  e  $L_{night}$ ), come richiesto dalla Procedura 15.2 CTN\_AGF. Il primo passo è volto alla determinazione della massima area di influenza del rumore infrastrutturale: le simulazioni sono state condotte sul modello digitale del terreno in campo acustico libero (completa assenza di edifici ed elementi schermanti) per la determinazione della  $D_{max}$ , massima distanza di propagazione corrispondente alla curva isolivello 55 dBA per  $L_{den}$  e 50 dBA per  $L_{night}$ , misurata ortogonalmente all'asse dell'infrastruttura. Di seguito sono riportate, a titolo di esempio, le mappature  $L_{den}$  ottenute nella prima fase di simulazione (Figg.1-3):

Fase 3: realizzazione delle mappature acustiche finali. Successivamente, sulla base degli esiti raggiunti ( $D_{max}$  amplificata del 50%), è stata determinata l'area di calcolo potenzialmente interessata dal disturbo acustico dell'infrastruttura, all'interno della quale viene confinata la *popolazione potenzialmente disturbata* (nel caso in esame dista circa 306 m dall'asse stradale) e vengono condotte le

simulazioni acustiche finali, volte alla stima della popolazione effettivamente esposta a livelli oltre i valori di soglia.

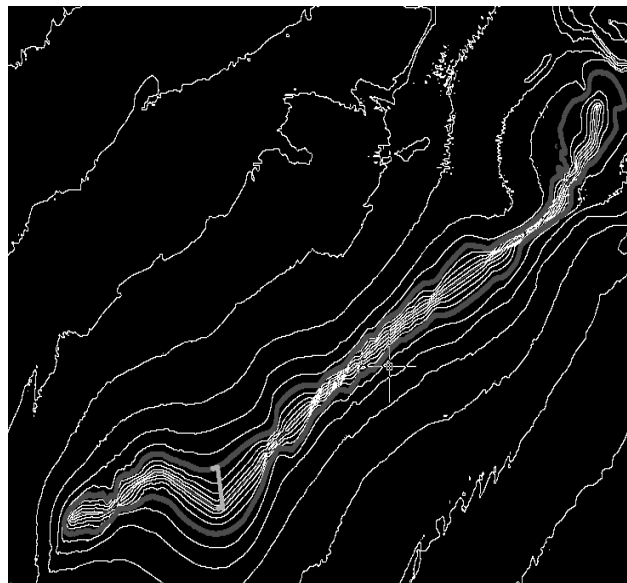


Figura 1 - Determinazione  $D_{max}$  su mappa  $L_{den}$ .

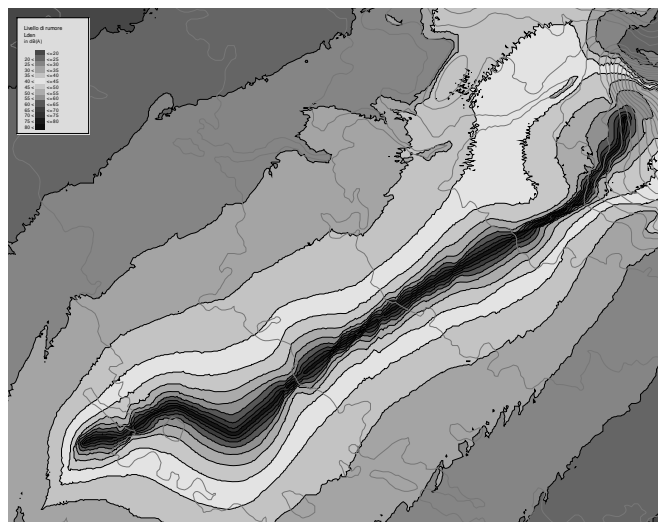


Figura 2 - Mappa di rumore 2D  $L_{den}$  in campo libero.

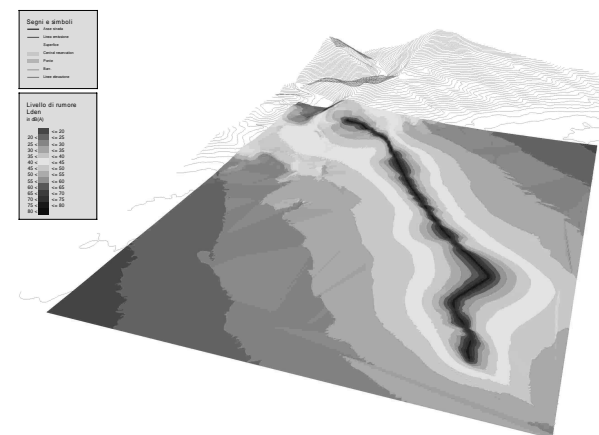


Figura 3 - Mappa di rumore 3D  $L_{den}$  in campo libero.

La Fase 3 ha visto la realizzazione delle mappe finali, condotte con l'inserimento dei volumi propri del tessuto urbanistico reale (livelli acustici valutati a 4m. dal suolo, come imposto dalle Norme comunitarie): in queste condizioni, la propagazione del rumore generato dall'infrastruttura avviene in presenza di ostacoli a causa dell'effetto schermante prodotto dagli edifici (Figg.4-5).

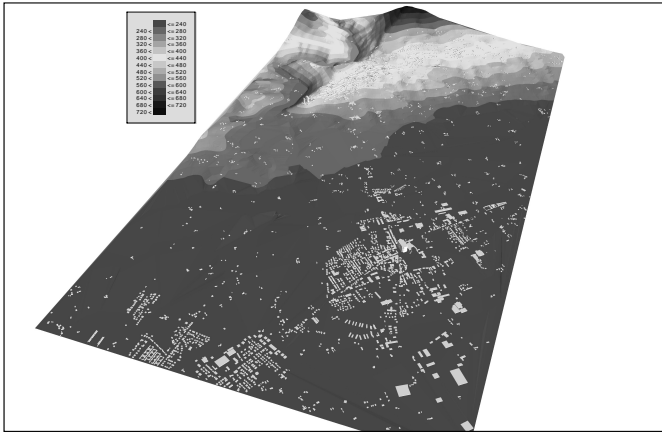


Figura 4 - DGM planivolumetrico dell'area.

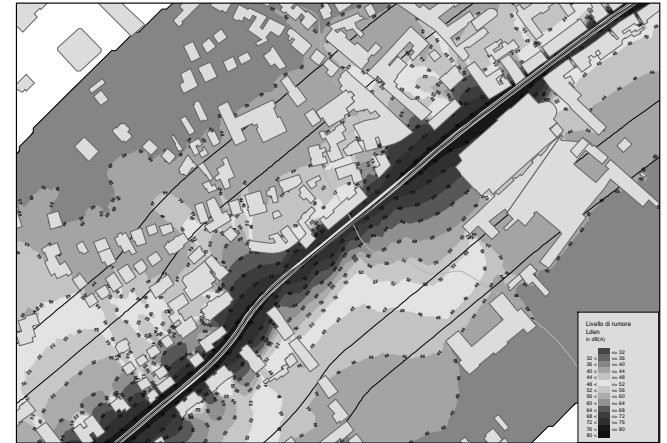


Figura 6 - Dettaglio mappa di rumore 2D  $L_{den}$  in area urbana.

**Procedura 2.** Si abbandona l'ipotesi di popolazione distribuita in modo uniforme a favore di una distribuzione riferita alla sola zona residenziale. Data l'assenza di informazioni esaurienti sulla collocazione spaziale delle aree residenziali, per valutare il numero di persone esposte nell'*i*-esima fascia di rumore all'interno della sezione di censimento si valuta un coefficiente correttivo *H*; tale coefficiente tiene conto della percentuale di area residenziale (dato facilmente reperibile dai dati socio-demografici ISTAT) rispetto all'area della sezione di censimento ed è dato da:

$$H = \frac{A_{res}}{A_{sez}} \quad (1)$$

dove:

$A_{res}$  è l'area residenziale totale di tutti gli alloggi presenti nella sezione;

$A_{sez}$  è l'area della sezione di censimento.

L'area residenziale totale è riferita a dati Istat 2001 e tiene conto di tutti i metri quadri effettivi di alloggio disponibili all'interno di un edificio, considerando pertanto tutti i piani presenti.

Ricavato *H*, si calcola il numero di persone esposte presenti tra due fasce isolivello contigue all'interno di una sezione censuaria, utilizzando la seguente formula:

$$N_i = \frac{A_{int}}{A_{res}} \times H \times N_{tot} \quad (2)$$

dove:

$A_{int}$  è l'area di intersezione tra due isolivello e sezione censuaria,

$N_{tot}$  è il numero di persone totale presente nella sezione censuaria.

**Procedura 3.** Nel caso in cui sia nota la superficie residenziale, la procedura 3 consiste nell'effettuare i seguenti passaggi:

- si divide la superficie complessiva dell'area destinata ad uso residenziale, o di parti di essa, per il numero dei residenti, ottenendo così i mq a disposizione per singolo residente.



Figura 5 - Esempio di mappatura 2D previsionale del rumore prodotto all'interno dell'area di calcolo(indicatore  $L_{den}$ ).

Particolare attenzione va posta nella verifica puntuale dei livelli nelle aree contraddistinte da densità edilizia variabile, al fine di verificare l'assenza di anomalie acustiche (fig.6).

### 3.3 Le procedure CTN\_AGF per la stima della popolazione esposta

La stima della popolazione esposta al rumore generato dalla infrastruttura stradale SR147\_DIR ha visto l'applicazione delle procedure 2 e 3 indicate dal CTN\_AGF, ritenute, alla luce delle esperienze condotte nei precedenti casi di studio, più adatte allo scopo; la procedura 1, applicata ai precedenti casi di Foligno e Fabriano, non è stata presa in considerazione in quanto, ipotizzando semplicemente una distribuzione uniforme della popolazione residente entro la generica area di censimento ISTAT, non fornisce informazioni precise sulla collocazione spaziale dei residenti all'interno della sezione

- successivamente si determina l'area in pianta del singolo edificio e la si moltiplica per il numero dei piani, ottenendo così i mq totali ad uso residenziale disponibili nell'edificio.
- si dividono, quindi, i mq ad uso residenziale disponibili nell'edificio per i mq a disposizione per singolo residente, ottenendo così il numero dei residenti nell'edificio:

$$N_i = \frac{\text{area\_tot\_residenziale}}{\text{area\_per\_residente}} \quad (3)$$

Qualora non sia noto il dato sull'area destinata ad uso residenziale, si applica un'altra procedura, analoga alla precedente, diversificandosi solo nella fase iniziale ove il dato dei mq a disposizione per singolo residente è ottenuto da statistiche su base nazionale o locale.

Infine, nel caso in cui non sia disponibile alcun dato sulla popolazione, si propone di procedere ad indagini sul campo al fine di conseguire una delle due seguenti finalità:

- conteggio dei residenti in ciascun edificio, operazione complessa e costosa ma che fornisce un dato accurato;
- stima del numero medio dei residenti per diverse tipologie di edifici ed assegnazione ad ogni edificio della tipologia di afferenza, procedura meno complessa e costosa ma che comporta una minore accuratezza del dato.

### 3.4 Applicazione delle procedure CTN\_AGF n.2 e n.3 al Comune di Assisi

Le operazioni di stima della popolazione hanno presupposto, contemporaneamente alla realizzazione delle mappature acustiche precedentemente discusse, il reperimento di informazioni socio-demografiche dettagliate ed aggiornate sulla popolazione residente nel Comune di Assisi, suddivisa nelle 118 aree censuarie ISTAT (per un totale di 25.285 abitanti e 10.231 abitazioni). Le sezioni effettivamente coinvolte dall'area di calcolo del disturbo sonoro sono 19 (Fig.7). Le informazioni riguardanti la popolazione del Comune di Assisi si riferiscono al *14° censimento generale ISTAT della popolazione e delle abitazioni* relativo all'anno 2001[17].

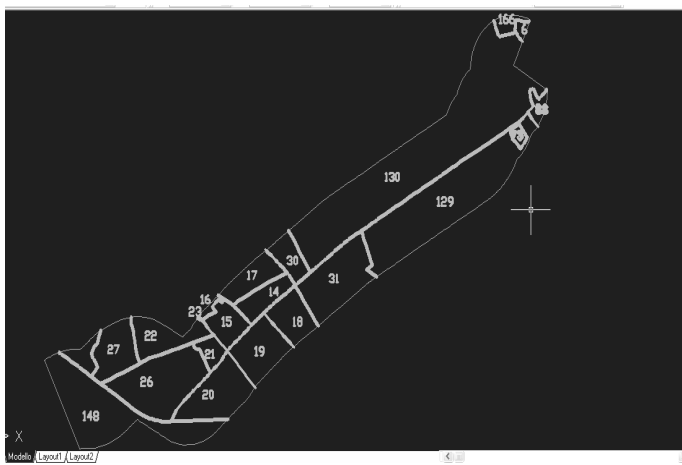


Figura 7 - Sezioni ISTAT 2001 coinvolte nell'area di studio.

Secondo quanto è riportato nel Decreto Legislativo del 19 agosto 2005, in attuazione della Direttiva 2002/49/CE, occorre stimare il numero di persone esposte a determinati valori di  $L_{den}$  e  $L_{night}$ , valutati a 4 metri di altezza e sulla facciata più

esposta dell'edificio. In particolare il Decreto propone di valutare il numero di persone esposte a intervalli di isolivello, ognuna delle quali differisce dall'altra di 4 dB(A), a partire dalla isolivello critica di  $L_{den}$  o  $L_{night}$ , al di sopra della quale si arriva al superamento dei limiti imposti dalle norme.

Le isolivello sono quindi state distinte nei seguenti intervalli in dB(A):

- per  $L_{den}$ : 55-59, 60-64, 65-69, 70-75, >75;
- per  $L_{night}$ : 50-54, 55-59, 60-64, 65-69, >70.

Procedura 2. L'applicazione della metodologia 2 ha reso possibile il calcolo del numero di persone effettivamente esposte per ogni sezione Istat e per ogni periodo, riferendolo al numero di persone potenzialmente esposte oppure al totale dei residenti presente in ogni sezione (Fig.8 e Tab.1).

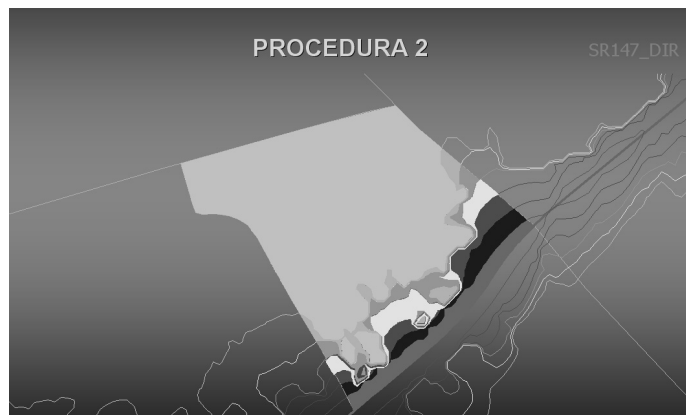


Figura 8 - Criterio di stima delle aree interessate dai superamenti (Procedura n.2 - indic.L<sub>den</sub>).

Procedura 3. Per la stima delle persone esposte al rumore, la procedura 3 proposta dal CTN\_AGF si prefigge di determinare il numero di residenti esposti ad inquinamento acustico in ogni edificio interessato dal superamento dei livelli acustici di soglia; nel caso studio in oggetto, tale dato non è reperibile, conoscendo tuttavia il numero dei residenti appartenenti ad una certa area residenziale. Come nel caso della procedura 2, si calcolano il numero dei residenti potenzialmente esposti e quello dei residenti effettivamente esposti a livelli superiori di 55 dB(A) nel periodo den e 50 dB(A) nel periodo night (Fig.9 e tab.2).

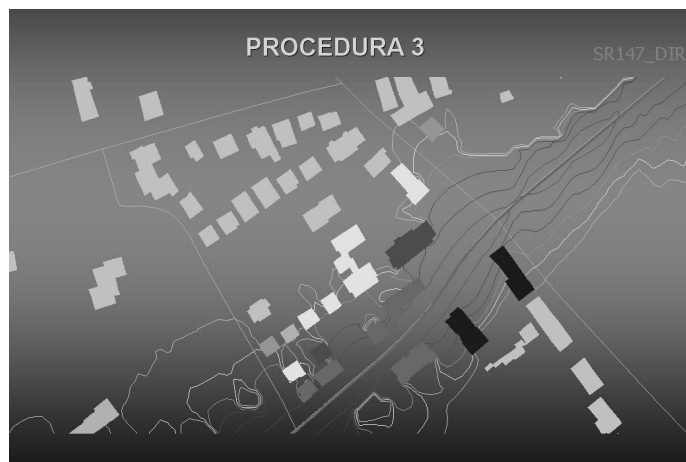


Figura 9 - Criterio di stima degli edifici interessati dai superamenti (Procedura n.3 – indicatore L<sub>den</sub>).

### 3.5 Analisi critica delle procedure applicate al caso della SR147\_DIR

Le due procedure forniscono risultati molto interessanti dal punto di vista applicativo per quanto sostanzialmente differenti in termini di grado di accuratezza. Le procedure applicate appaiono piuttosto intuitive e semplici a livello di applicazione, sebbene la procedura 3 si riveli più complicata ai fini della sua completa esecuzione (necessita di dati Istat aggiornati e completi, richiede una cartografia CTR aggiornata all'anno dei dati ISTAT, presenta problematiche di ordine grafico nella interpretazione corretta e veloce di una cartografia complessa che vede unite informazioni CTR ed informazioni acustiche).

Tabella 1 - Risultati finali distinti per area ISTAT delle stime di popolazione esposta (procedura n.2).

Sezione	Pop.esposta Lden (>55dB(A))	Pop.esposta Ln (>50dB(A))	Pop.pot.esposta Lden	Pop.pot.esposta Ln	Totale residenti
6	2	0	42	43	268
14	35	32	193	194	195
15	39	36	247	247	248
16	0	0	55	55	414
17	0	0	401	401	823
18	9	8	112	112	233
19	15	14	92	92	168
20	50	40	212	211	273
21	73	66	255	255	256
22	3	2	73	73	126
23	0	0	1	1	265
26	125	112	220	221	223
27	88	70	465	464	814
30	7	6	86	87	258
31	27	24	155	155	482
129	7	6	37	37	378
130	14	10	43	44	281
148	3	3	19	19	312
166	0	0	1	1	141
<b>TOTALE</b>	<b>497</b>	<b>422</b>	<b>2710</b>	<b>2713</b>	<b>6158</b>
%	18,3	15,5	rispetto alla popolazione potenzialmente esposta		
%	8,1	6,8	rispetto alla popolazione totale residente		

Tabella 2 - Risultati finali distinti per area ISTAT delle stime di popolazione esposta (procedura n.3).

Sezione	Pop.esposta Lden (>55dB(A))	Pop.esposta Ln (>50dB(A))	Pop.pot.esposta Lden	Pop.pot.esposta Ln	Totale residenti
6	0	0	0	0	268
14	118	118	205	205	195
15	21	21	253	253	248
16	0	0	32	32	414
17	0	0	310	313	823
18	137	137	221	221	233
19	0	0	152	152	168
20	46	46	231	231	273
21	74	72	163	163	256
22	18	12	99	99	126
23	0	0	0	0	265
26	139	109	216	216	223
27	98	73	356	356	814
30	42	42	154	154	258
31	78	75	394	398	482
129	99	71	152	152	378
130	125	125	206	206	281
148	41	41	135	133	312
166	0	0	2	2	141
<b>TOTALE</b>	<b>1036</b>	<b>942</b>	<b>3281</b>	<b>3286</b>	<b>6158</b>
%	31,6	28,7	rispetto alla popolazione potenzialmente esposta		
%	16,8	15,3	rispetto alla popolazione totale residente		

Dall'analisi delle tabelle di riepilogo (fig.10) emerge, a parità di procedura seguita, la pressoché totale collimazione della popolazione disturbata sia con i livelli  $L_{den}$  che  $L_{night}$ , a testimonianza del notevole carico acustico della strada nell'arco delle 24 h. L'introduzione del concetto di "popolazione potenzialmente esposta", contenuta all'interno dell'area di calcolo, porta nel primo caso (Procedura 2) alla

quantificazione del 44% del totale dei residenti (sia  $L_{den}$  che  $L_{night}$ ), mentre nel secondo caso (Procedura3) al 53% del totale dei residenti, superando il concetto con cui l'intera popolazione di una zona censuaria possa essere potenzialmente interessata dall'inquinamento acustico prodotto da una infrastruttura. Tuttavia, le incongruenze mostrate dal metodo in alcune sezioni ISTAT tra residenti esposti al rumore e residenti effettivi, rivelano l'inadeguatezza del metodo qualora non si disponga di dati puntuali circa la distribuzione residenziale e la tipologia edilizia esistente. I risultati derivanti dalla procedura 3 devono pertanto essere interpretati con sufficiente attenzione, rimarcando l'assoluta necessità di dati attendibili ed accurati, pena l'inapplicabilità della procedura.

	PROCEDURA 2		PROCEDURA 3	
	Lden	Lnight	Lden	Lnight
<b>Tot. popolazione effettivamente esposta</b>	<b>501</b>	<b>430</b>	<b>1036</b>	<b>942</b>
<b>% Popolazione effettivamente esposta in relazione alla popolazione potenzialmente esposta</b>	<b>18,4</b>	<b>15,7</b>	<b>31,6</b>	<b>28,7</b>

Figura 10 - Risultati sintetici delle stime di popolazione esposta effettuate sul Comune di Assisi.

## 4. CONCLUSIONI

Uno degli obiettivi introdotti dalla direttiva 2002/49/CE è la raccolta di informazioni sullo stato di esposizione al rumore della popolazione nei diversi Stati Membri.

Le indagini sul territorio italiano mettono in evidenza la scarsità dei dati a disposizione, la disomogeneità degli stessi, la necessità di predisporre quanto prima di procedure condivise per la determinazione dell'indicatore.

Impiegando alcune metodologie sviluppate da Apat in collaborazione con il sistema delle Agenzie, è stata avviata una ricerca in collaborazione con Arpa Umbria sulla popolazione esposta al rumore nella regione Umbria in alcuni casi di studio, ed in particolare nel territorio dei Comuni di Foligno, Fabro ed Assisi.

Il quadro conoscitivo delle metodologie contemplate dalle Norme si è andato progressivamente delineando a seguito delle applicazioni ai casi di studio esaminati nel corso della Ricerca, pervenendo ad esiti incoraggianti circa la messa a punto e l'analisi critica delle metodiche adottate. In particolare, l'approccio utilizzato per l'ultimo caso di studio, relativamente alla SR147\_DIR nel Comune di Assisi, ha consentito la definizione di una metodologia globale di indagine acustica in linea con la Normativa Europea, introducendo concetti ed elementi di novità rispetto ai casi di Foligno e Fabro, in special modo per quanto attiene alla fase di mappatura acustica. La realizzazione della cartografia acustica è stata condotta in funzione dei descrittori acustici  $L_{den}$  e  $L_{night}$  recentemente introdotti a livello comunitario, in contrapposizione agli indicatori  $L_d$  ed  $L_n$ , abitualmente contemplati dalle norme italiane; in particolare, l'utilizzo di  $L_{den}$  al posto di  $L_{day}$ , tiene maggiormente conto della evoluzione giornaliera dei livelli di rumore prodotti da una infrastruttura, in particolar modo se soggetta a flussi di traffico veicolare notevole anche in orari notturni; inoltre le soglie di 55 dB(A) (riferita al periodo *den*) e di 50 dB(A) (riferita al periodo *night*), introdotte dalla Direttiva, vanno nel senso di

abbassare la soglia critica considerata come disturbo indotto sulla popolazione residente.

Novità di rilievo è rappresentata dal ricorso alla procedura 15.2 del CTN\_AGF introdotta in fase simulativa: mediante una simulazione iniziale in campo libero si determina l'area di influenza acustica dell'infrastruttura, coincidente con l'area del calcolo per la simulazione finale. Questa procedura intende realizzare una specie di confinamento dell'area di studio in modo da fornire un quadro di indagine più chiaro per una maggiore aderenza fisica ai meccanismi di propagazione acustica sul territorio esaminato. L'introduzione dell'area di calcolo CTN\_AGF ha consentito, nel caso di Assisi, di affermare un concetto innovativo rispetto ai casi di studio precedenti, definito dai due livelli di *popolazione potenzialmente esposta e popolazione effettivamente esposta*: solo un'aliquota (0-100%) della popolazione totale residente in ciascuna sezione censuaria, viene considerata come potenzialmente esposta al rumore generato dall'infrastruttura; su di essa verrà successivamente stimata la percentuale di residenti effettivamente interessati da inquinamento acustico.

La determinazione della superficie di pertinenza acustica della strada prelude alle mappature finali, eseguite mediante caratterizzazione 3D puntuale dei comparti catastali coinvolti (orografia, edifici...).

Dall'analisi comparata dei risultati ottenuti si nota come la procedura 3 restituisca, in tutti i casi esaminati, stime di popolazione esposta più elevate delle altre procedure. Tale metodologia, sotto il profilo teorico, è senza dubbio la più accurata e quindi maggiormente cautelativa in termini di pianificazione degli interventi di bonifica. L'impiego delle procedure 1 e 2 ai casi di Foligno e Fabriano ha messo in evidenza come esse conducano a stime percentuali non dissimili; l'uso della procedura 1 è stato pertanto favorevolmente abbandonato a beneficio della procedura 2, mediante la quale si tiene maggiormente conto della distribuzione di densità residenziale all'interno di ciascuna sezione censuaria ISTAT.

L'analisi comparativa delle metodologie utilizzate (casi di Foligno, Fabriano, Assisi) consente di affermare che la Procedura 2 può essere considerata molto valida per l'analisi acustica di area vasta in presenza di molteplici infrastrutture stradali, data la sua velocità di impiego; essa tende tuttavia ad una sottostima in relazione al valore effettivo, necessitando pertanto di fattori amplificativi di sicurezza. La Procedura 3, d'altro canto, si rivela molto più complessa ed accurata dal punto di vista operativo ma meno diretta e veloce, necessitando di una notevole quantità di informazioni preliminari; il dato finale fornito risulta tuttavia più accurato: la stima della popolazione esposta viene eseguita in modo puntuale andando a determinare il numero di residenti effettivamente presenti all'interno di ogni edificio della sezione Istat. Per i presupposti teorici su cui si fonda e per i riscontri numerici ottenuti, quest'ultima procedura risulta senza dubbio quella con maggiore grado di precisione tra quelle esaminate, agendo a favore di sicurezza in relazione alla tutela della popolazione esposta al rumore; il grado di accuratezza raggiungibile e la veridicità delle percentuali finali, tuttavia, dipendono fortemente dalla disponibilità, dalla completezza e dall'aggiornamento dei dati catastali e socio-demografici preliminari, elemento non secondario se rapportato alla non semplice reperibilità degli stessi presso le Amministrazioni Pubbliche.

L'approccio mediante sopralluoghi tecnici in loco, così da determinare con estrema accuratezza la posizione, il numero di vani esposti ai livelli di rumore maggiori, l'utilizzo effettivo

dei piani terra e delle mansarde, risulterà tuttavia praticabile solo per estensioni territoriali estremamente contenute, determinando di fatto l'inapplicabilità del metodo alle indagini acustiche su area vasta.

Con le procedure elaborate per la stima della popolazione esposta si sono comunque conseguiti risultati soddisfacenti per i Comuni analizzati. Ciò suggerisce la validazione delle metodologie e la loro applicazione ad altre realtà comunali della Regione Umbria.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Direttiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio 25 giugno 2002, Determinazione e gestione del rumore ambientale, GUCE L 189/12, 18.7.2002, Bruxelles.
2. D.L. 19 agosto 2005 n. 194 Attuazione della direttiva 2002/49/CE relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale
3. Modello DPSIR, EEA European Environment Agency, 1995
4. The ECHI project: health indicators for the European Community, European Journal of Public Health, Volume 13, Supplement 1, September 2003
5. CTN- AGF Indicazioni operative per la costruzione dell'indicatore popolazione esposta al rumore in riferimento alla Direttiva 2002/49/CE, APAT - Centro Tematico Nazionale Agenti Fisici, 2004.
6. Legge 26 ottobre 1995, n. 447, Legge Quadro sull'inquinamento acustico, supplemento ordinario della G.U. n. 254 del 30/10/1995
7. DM 29 novembre 2000 Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto e delle relative infrastrutture, dei piani e degli interventi di contenimento ed abbattimento del rumore
8. AA. VV., Rumore, Annuario dei dati ambientali APAT 2004.
9. EEA, Traffic noise: exposure and annoyance, European Environmental Agency, Copenhagen 2001.
10. WG-AEN, Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure, European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise, 5 dicembre 2003.
11. AA. VV., 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.
12. Brambilla G., Poggi A., Indicazioni operative per la costruzione dell'indicatore "Popolazione esposta al rumore" in riferimento alla Direttiva 2002/49/CE, CTN\_AGF, Bologna 18 gennaio 2005.
13. Asdrubali F., Buratti C., Baruffa R., Piro V., Piani comunali di risanamento acustico: individuazione delle priorità negli interventi di bonifica XXV Congresso Nazionale AIA, Perugia, 21-23 maggio.
14. Asdrubali F., Curcuruto S., Simoncini C., Angelucci M., Presciutti A., Il catasto acustico della Regione Umbria, 31° Convegno Nazionale AIA, Venezia, 5-7 maggio 2004.
15. F. Asdrubali, C. Buratti, G. Baldinelli, La mappatura acustica del territorio del Comune di Foligno, Quaderno CIRIAF n. 18 Ottobre 2001.
16. F. Asdrubali, C. Simoncini, M. Angelucci, La valutazione della popolazione esposta al rumore: metodologie ed applicazioni nella Regione Umbria, 6° Congresso Nazionale CIRIAF, Aprile 2006
17. ISTAT, Censimento generale della popolazione e delle abitazioni del Comune di Assisi relativo all'anno 2001.



## PIANO DI RISANAMENTO ACUSTICO LUNGO LA RETE STRADALE IN GESTIONE A VENETO STRADE SPA

M. Strada<sup>1</sup>, A. Lisiero<sup>2</sup>, A. Alvaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Istituto Universitario di Architettura di Venezia, <sup>2</sup> Steam S.r.l.(PD) ,

### SOMMARIO

Il presente documento illustra lo studio realizzato per la redazione del piano di risanamento acustico ai sensi del DECRETO 29 novembre 2000 lungo la rete stradale in gestione a Veneto Strade SPA.

Lo studio è stato sviluppato seguendo la seguente metodologia:

- Esecuzione di misure fonometriche e rilievi dei flussi di traffico in corrispondenza di aree critiche individuate attraverso un'indagine preliminare di vasta scala;
- Realizzazione di mappe acustiche dell'area circostante l'infrastruttura mediante un apposito software di simulazione tridimensionale.
- Definizione degli interventi di risanamento e relativi tempi di realizzazione;
- Redazione di mappe acustiche con riferimento allo stato di progetto mitigato a dimostrazione dell'efficacia degli interventi proposti.

### PREMESSA

Il presente documento illustra lo studio realizzato per la redazione del piano di risanamento acustico ai sensi del DECRETO 29 novembre 2000 lungo la rete stradale in gestione a Veneto Strade SPA.

L'analisi dello stato acustico dell'ambiente ha prefigurato una caratterizzazione dei livelli sonori all'interno di un corridoio di indagine di ampiezza pari a 400 m per lato a partire dal ciglio esterno della sede stradale.

Le indagini sono state effettuate su aree che vengono segnalate come critiche dal Gestore stesso, nonché sulle situazioni "storicamente" già note, ovvero oggetto di segnalazioni/esposti della popolazione o anche in aree la cui particolare criticità emerga, fin dalle prime analisi, dal sovrapporsi di più elementi negativi quali gli elevati flussi di traffico, la presenza di ricettori sensibili -scuole, ospedali, ecc.-, la presenza di insediamenti residenziali con elevata densità di popolazione.

### QUADRO NORMATIVO

Allo stato attuale, per la valutazione della tollerabilità del rumore in ambiente esterno e negli edifici, sono vigenti le seguenti disposizioni di legge:

- DPCM 1.3.91 "Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno"
- Legge 26.10.95 "Legge quadro sull'inquinamento acustico";
- DPCM 14.11.97 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore";
- DM 16.03.98 "Tecniche di rilevamento e di

misurazione dell'inquinamento acustico";

- DM 29.11.2000 "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;
- DPR 30.03.04 Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell'inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare,

Ai fini del presente studio si è fatto riferimento a quanto definito nel D.M. del 29 novembre 2000, che impone agli enti gestori delle infrastrutture di trasporto di individuare preliminarmente le Aree di Criticità acustica e successivamente presentare ai Comuni interessati i piani di contenimento ed abbattimento del rumore, in cui siano indicati tempi di attuazione, modalità e costi degli interventi.

### DESCRIZIONE DELLE AREE DI INTERVENTO

Le tratte stradali esaminate e le relative estensioni sono elencate in Tabella 1:

Si tratta di infrastrutture con flussi di traffico superiori ai 6 milioni di veicoli annui e caratterizzate da un notevole carico di mezzi pesanti.

Le tratte analizzate si possono ricondurre essenzialmente a due categorie:

- strade tangenziali con due corsie per senso di marcia che scorrono all'esterno dei centri urbani e sono caratterizzate da elevate velocità di percorrenza
- strade ad unica carreggiata ed unica corsia per senso di marcia che attraversano e collegano più centri abitati

Tabella 1 – Elenco tratte stradali interessate

Nome strada	km
SR 348 "Feltrina" da Treviso a Montebelluna	17,0
SR 53 "Postumia" da Silea a Portogruaro	46,0
SR 53 "Postumia" tangenziale di Treviso	10,0
SR 53 "Postumia" da Castelfranco a Paese	21,0
SR 11 "Padana Superiore" da Torri di Quartesolo a Padova	21,0
SR 47 "di Altichiero" Tangenziale di Padova	10,2
SP 47 "Valsugana" da Cittadella a Limena	26,0
SR 10 "Padana Inferiore" Tangenziale di Legnago	4,5
SR 14 "Mestre Est" da SS13 a SS14	5,6
SR 450 "di Affi" da Affi a SR11	13,3
SR 515 "Noalese" da Ponte di Brenta a Santa Maria di Sala	10,0
SR 54 "di Castelfranco" tangenziale di Castelfranco	4,6



Figura 1 – Strada Regionale 53 "Postumia"

## LIMITI DI LEGGE

Il DPR 30.03.04 definisce l'estensione delle fasce di pertinenza delle infrastrutture viarie all'interno delle quali non valgono i limiti previsti dalla zonizzazione acustica.

Per le strade esistenti, il loro ampliamento in sede, le nuove infrastrutture in affiancamento a quelle esistenti e le loro varianti, vengono definite due distinte fasce di pertinenza: fascia A e fascia B.

Nel caso di strade extraurbane secondarie esistenti, come quelle in oggetto, la suddette fasce di pertinenza hanno un'ampiezza pari rispettivamente a 100 m e 150 m per strade a carreggiate separate e pari a 100 m e 50 m negli altri casi; i valori limite all'interno delle suddette fasce sono riportati in Tabella 2:

All'esterno delle fasce di pertinenza le infrastrutture di trasporto concorrono al raggiungimento dei limiti assoluti di immissione (come specificato dall'art. 3, comma 2 del DPCM 14 novembre 1997) previsti dai piani di zonizzazione acustica comunali.

Laddove non si disponga di un piano di zonizzazione, al fine di poter attribuire a ciascun ricettore esterno alla fascia territoriale di pertinenza i limiti prescritti dal D.P.C.M. 14/11/97, sono state ipotizzate delle classi acustiche sulla base dei sopralluoghi effettuati e sulla base del PRG adottato.

Tabella 2 - Valori limite all'interno delle fasce di pertinenza

TIPO DI STRADA	SOTTOTIPI A FINI ACUSTICI	Ampiezza fascia di pertinenza (m)	Scuole, ospedali, case di cura e di riposo		Altri ricettori	
			Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)	Diurno dB(A)	Notturmo dB(A)
C extraurbana secondaria	Ca (strade a carreggiate separate e classe IV CNR 1980)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		150 (fascia B)			65	55
	Cb (tutte le altre strade extraurbane secondarie)	100 (fascia A)	50	40	70	60
		50 (fascia B)			65	55

## INDIVIDUAZIONE AREE CRITICHE E RICETTORI SENSIBILI

La prima parte dello studio è stata rivolta all'individuazione di aree particolarmente critiche all'interno di un corridoio di indagine di ampiezza pari a 400 m per lato a partire dal ciglio esterno della sede stradale.

L'analisi preliminare ha comportato il reperimento dei piani di zonizzazione acustica dei comuni interessati e l'analisi di tutte le segnalazioni e gli esposti della popolazione e degli Uffici Tecnici Comunali.

Sempre all'interno del corridoio di indagine sono stati infine individuati i ricettori sensibili quali scuole, ospedali e case di riposo per anziani nonché gli insediamenti residenziali con più elevata densità di popolazione.

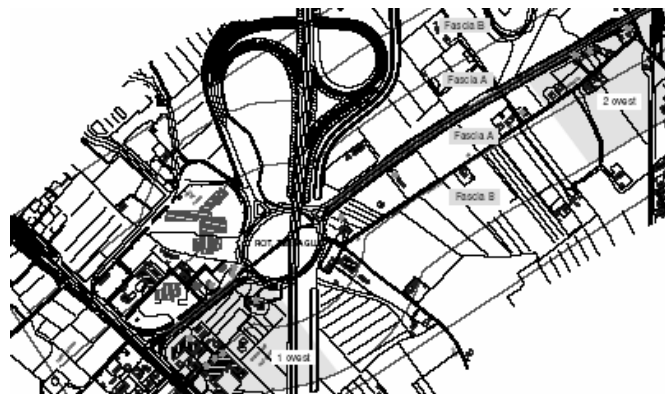


Figura 2 – Individuazione aree critiche

## MISURE FONOMETRICHE E RILIEVI DEI FLUSSI DI TRAFFICO

Le aree critiche, individuate attraverso l'indagine preliminare di vasta scala, sono state sottoposte ad analisi acustica secondo una specifica metodologia che prevede l'utilizzo di modelli previsionali tarati su campagne di misura settimanali e di tipo spot.

Le misure fonometriche sono state realizzate seguendo le indicazioni contenute nel decreto del Ministero dell'Ambiente del 16 Marzo 1998.

Sono stati effettuati rilievi sia di breve durata che in continuo per la durata di una settimana in condizioni di normale circolazione del traffico veicolare.

Il microfono, dotato di cuffia antivento ed orientato verso la sorgente di rumore, è stato posto ad una quota da terra pari a 4m.

Il misuratore di livello sonoro è stato predisposto per l'acquisizione dei livelli equivalenti di pressione sonora ponderati con curva di ponderazione tipo "A" per intervalli successivi della durata di 1 minuto. Mediante un apposito software sono state poi realizzate aggregazioni dei dati con riferimento per intervalli temporali pari a 1 ora.

Per il conteggio e la classificazione dei veicoli è stato utilizzato un rilevatore di traffico a microonde con sensore radar "Doppler" bidirezionale o in alternativa due rilevatori di traffico con sensore radar "Doppler" monodirezionali posti uno di fronte all'altro in corrispondenza della sezione stradale da monitorare.

Il rilevatore è stato installato a bordo strada ad un'altezza compresa tra 0,5m e 1m dal piano stradale e il sensore, nel caso di rilevatore bidirezionale, è stato impostato per registrare i movimenti dei veicoli in entrambi i sensi di marcia misurandone la velocità, la lunghezza e la distanza temporale fra i veicoli.

Il monitoraggio dei flussi di traffico è stato effettuato in continuo per la durata di una settimana contemporaneamente all'acquisizione dei livelli di rumorosità. Mediante un apposito software sono state poi realizzate aggregazioni dei dati con riferimento alla distinzione in classi di lunghezza e velocità per intervalli temporali pari a 1 ora.



Figura 3 – Rilevatore flussi traffico

Sono stati indagati 42 punti dislocati lungo le varie tratte e per ciascuna postazione sono stati realizzati dei report di misura contenenti i seguenti dati:

- localizzazione del punto di misura
- periodo del rilevamento
- documentazione fotografica e descrizione del sito
- i livelli di rumore rilevato
- il numero e la classificazione dei veicoli rilevati.

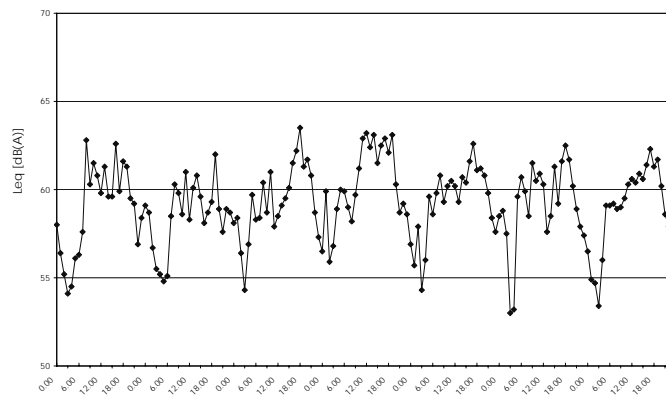


Figura 4 – Storia temporale dei Leq [dB(A)]

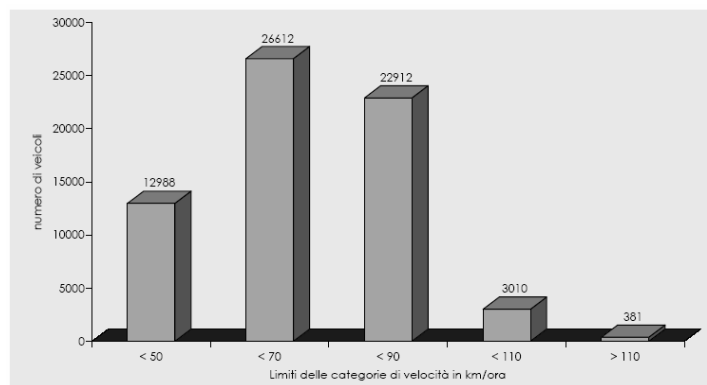


Figura 5 – flussi di traffico in funzione della velocità

I risultati della campagna di monitoraggio hanno evidenziato un frequente superamento dei limiti diurni e notturni in corrispondenza dei ricettori più prossimi alla sede stradale. In particolar modo l'eccessiva rumorosità può essere imputabile sia al grosso volume di mezzi pesanti che percorrono le tratte in oggetto, sia alle eccessive velocità tenute dai veicoli leggeri.

A titolo di esempio si riporta una tabella riepilogativa indicante i valori di rumorosità giornalieri e medi settimanali rilevati durante il periodo diurno e il periodo notturno.

Tabella 3 – Esempio di valori di rumorosità rilevati

	<b>Leq diurno (06:00-22:00) [dB(A)]</b>	<b>Leq notturno (22:00-06:00) [dB(A)]</b>
giovedì	71,5	67,8
venerdì	71,8	68,2
sabato	71,0	66,8
domenica	68,8	65,4
lunedì	70,5	68,5
martedì	71,7	67,6
mercoledì	71,8	67,4
<b>MEDIO SETTIMANALE</b>	<b>71,1</b>	<b>67,5</b>

## MODELLO ACUSTICO TRIDIMENSIONALE

La metodologia adottata per la valutazione del clima acustico consiste nella creazione di un modello acustico tridimensionale che permette la stima della rumorosità introdotta dalle infrastrutture stradali nell'area di indagine

Il modello considera i principali fenomeni caratterizzanti la

propagazione del rumore dalla sorgente al ricettore, quali le riflessioni del primo ordine e secondarie, le diffrazioni semplici e multiple, le attenuazioni per divergenza ed assorbimento

Nella valutazione e previsione del rumore nell'ambiente esterno i modelli numerici sono strumenti utili e spesso indispensabili.

Indipendentemente dalla loro struttura, i diversi modelli utilizzati per la predizione del rumore si rifanno ad un analogo schema di funzionamento che prevede:

- rappresentazione numerica del sito in esame;
- modellizzazione numerica della sorgente eseguita tramite definizione dell'emissione sonora o del rumore immesso in una prefissata posizione di riferimento;
- modellizzazione numerica della propagazione sonora nel percorso congiungente la sorgente ai ricettori;
- rappresentazione in forma numerica e grafica dei risultati.

La rappresentazione dell'area in esame costituisce probabilmente la fase più critica della procedura e quella maggiormente vincolata all'intervento dell'utente. In essa dovranno essere introdotti i dati per una completa rappresentazione del sito che includa l'orografia del terreno e le coordinate spaziali degli insediamenti antropici. Tutti gli elementi introdotti dovranno essere correlati con le relative proprietà acustiche, specificate secondo la metodologia prevista dal modello.

L'attività di simulazione è stata eseguita mediante il software SoundPLAN, conforme alla norma internazionale ISO 9613 e utilizzando lo standard di calcolo "NMPB-Routieres - 96", come richiesto dal DECRETO LEGISLATIVO 19 agosto 2005, n.194 sulla gestione del rumore ambientale.

I dati su cui si basa il processo di calcolo scaturiscono dalla digitalizzazione del sito e dei punti recettori, dai dati di traffico e dalle misure fonometriche; il software poi elabora le relazioni esistenti fra un punto preciso e i canali di circolazione ed effettua i calcoli acustici editando i risultati finali sotto forma di mappe del rumore.

## CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DELLO STATO ATTUALE

Prima di procedere alla stima della rumorosità e alla redazione delle mappe acustiche, è necessario procedere alla taratura del modello al fine di verificare l'attendibilità di alcune delle ipotesi assunte quali ad esempio l'assorbimento acustico del terreno, le schermature prodotte da ostacoli e l'assorbimento atmosferico.

La calibrazione avviene attraverso le seguenti fasi:

- esecuzione della simulazione acustica utilizzando i dati di traffico rilevati
- confronto tra il valore di rumorosità calcolato e quello effettivamente misurato
- correzione del valore di emissione dello standard utilizzato fino ad ottenere uno scarto tra valore calcolato e valore rilevato inferiore a 2 dB(A).

Per quanto riguarda i volumi di traffico, i dati sono stati disaggregati per periodo di riferimento della giornata e per tipologie di mezzi di trasporto e sono stati introdotti nel modello in termini di :

TOMD = Traffico orario medio diurno (TGM diurno 6÷22h

/ 16 ore)

TOMN = Traffico orario medio notturno (TGM notturno 22÷6h / 8 ore)

%VPD = Percentuale di veicoli pesanti nel periodo diurno

%VPN = Percentuale di veicoli pesanti nel periodo notturno

Si è quindi proceduto alla mappatura acustica del territorio tracciando mappe ad un'altezza di 4m dal suolo, con intervalli di LAeq di 5 dB, relative al periodo diurno e al periodo notturno.



Figura 6 – mappa acustica periodo notturno

## DEFINIZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE

Il confronto tra i livelli di rumore calcolati ed i valori limite di immissione previsti dalla normativa, ha permesso di determinare gli obiettivi di mitigazione acustica, sui quali sono stati dimensionati gli interventi attivi e passivi di risanamento. Gli interventi strutturali finalizzati all'attività di risanamento sono stati previsti secondo la seguente scala di priorità:

- direttamente sulla sorgente (asfalti fonoassorbenti)
- lungo la via di propagazione del rumore dalla sorgente al ricettore (barriere)
- direttamente sul ricettore (sostituzione degli infissi)

In particolare, laddove si sia riscontrata mancanza di spazio utile all'installazione di schermi antirumore, l'adozione di asfalti fonoassorbenti e drenanti è parsa la soluzione più indicata. Le pavimentazioni fonoassorbenti tradizionali sono realizzate mediante conglomerati bituminosi di tipo aperto. Il loro alto grado di porosità (volume dei vuoti superiore al 20%), ottenuto grazie all'uso di bitumi modificati con polimeri, oltre a garantire una maggiore sicurezza in caso di pioggia grazie alle proprietà drenanti, consente anche di ottenere attenuazioni acustiche per tutti i ricettori a prescindere dalla quota relativa all'infrastruttura. Detti asfalti consentono l'assorbimento acustico delle componenti tonali connesse al rumore di rotolamento generato nel contatto tra pneumatico e manto stradale e garantiscono un abbattimento acustico pari a circa 3dB.

L'adozione di barriere antirumore si è dimostrata invece efficace lungo i tratti di tangenziale laddove si dispone degli spazi necessari e l'intrusione visiva è meno impattante rispetto ad un'installazione in centro urbano. Sono state previste barriere di altezze comprese tra i 2 ed i 4 m e lunghezze variabili in funzione della dimensione longitudinale dell'area da proteggere.



Figura 7 – barriera antirumore all'ingresso di un centro urbano

Si è fatto ricorso ad interventi diretti sugli edifici solo nel caso di ricettori sensibili. La scelta della tipologia di serramento è stata effettuata verificando che il livello in ambiente interno, pari alla differenza tra il livello di immissione in facciata ed il potere fonoisolante del serramento, sia inferiore ai limiti di immissione interni (a centro stanza a 1,5m dal suolo e a finestre chiuse) indicati nel D.P.R. ovvero

- 35 dB(A) Leq notturno per ospedali, case di cura e case di riposo
- 40 dB(A) Leq notturno per gli altri recettori
- 45 dB(A) Leq diurno per le scuole

A conclusione del lavoro svolto sono state redatte mappe acustiche nella situazione di “post intervento” a dimostrazione dell'effettiva efficacia degli interventi previsti.

## INDICI DI PRIORITA'

Per definire il grado di priorità di esecuzione di ciascun intervento si è fatto riferimento a quanto illustrato nell'Allegato 1 del DM 29.11.2000.

Tutti i ricettori individuati sono stati raggruppati in aree unitarie di analisi, relativamente alle quali è stato calcolato un "indice di priorità", ovvero un indice numerico definito come segue:

$$P = \sum R_i (L_i - L_i^*)$$

dove  $R_i$  è un parametro legato alla densità demografica di ogni singola area e  $L_i - L_i^*$  è la differenza tra il livello di rumorosità prodotto dall'infrastruttura e il valore limite di immissione ammissibile

La valutazione della densità demografica è stata effettuata su base cartografica stimando il numero di abitanti in funzione dell'area degli edifici presenti e della relativa altezza.

Oltre al criterio analitico definito dalla normativa è parso opportuno stabilire l'ordine degli interventi di risanamento anche sulla base di considerazioni più soggettive.

In particolare la precedenza è stata data al risanamento in corrispondenza di ricettori sensibili quali scuole, ospedali e case di riposo e sono stati privilegiati gli interventi riguardanti il maggior numero di recettori o che risolvano situazioni particolarmente critiche.

## CONCLUSIONI

Il presente contributo ha illustrato le metodologie e i criteri tecnici utilizzati per la predisposizione di un "Piano degli

interventi di contenimento e abbattimento del rumore” di un'articolata rete di infrastrutture stradali seguendo quanto richiesto dalla vigente normativa.

Dallo studio effettuato è emersa innanzitutto l'importanza di acquisire un'approfondita conoscenza del territorio indagato, sia con riferimento all'individuazione delle criticità acustiche, sia in merito alla vera e propria conoscenza della morfologia del territorio ai fini di una corretta modellazione.

Per tale scopo si sono rese necessarie indagini in campo comprendenti campagne di misure fonometriche e rilievi dei flussi di traffico. E' stato inoltre fondamentale un continuo confronto con gli Uffici Tecnici dei comuni territorialmente interessati per una corretta comprensione delle richieste e delle esigenze della popolazione coinvolta.

Sulla base del confronto tra i valori di rumorosità ottenuti con le simulazioni e i limiti previsti dalla normativa sono stati dimensionati i seguenti tipi di interventi:

- adozione di asfalti fonoassorbenti in assenza di spazi trasversali utili per l'installazione di schermi antirumore
- installazione di barriere fonoassorbenti nei tratti di tangenziale e dove l'inserimento paesaggistico lo rendeva possibile
- interventi diretti sugli edifici nel caso di ricettori sensibili

Per definire le tempistiche di realizzazione degli interventi si è fatto riferimento al criterio analitico dettato dalla normativa integrandolo con considerazioni di carattere soggettivo che hanno portato a privilegiare le aree dove il problema dell'inquinamento acustico è maggiormente sentito dalla popolazione.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano l'Ing. Luigi Rizzo e l'Ing. Christiano Costantini per aver collaborato alla redazione del presente studio.

## BIBLIOGRAFIA

1. Mauro Strada et al “Studio di Impatto Ambientale, componenti “rumore”, relativo al progetto preliminare della Superstrada Pedemontana Veneta. Atti del 33° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica 2006
2. Mauro Strada et al.”Valutazione del rumore prodotto dalla nuova infrastruttura”Nuovo Passante autostradale di Mestre” e progettazione esecutiva interventi di risanamento” Atti del 32° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica Venezia 2005
3. Antonino di Bella. et al., “Le fasce marginali protettive per la mitigazione acustica del rumore da traffico stradale”, Atti del 32° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica Venezia 2005
4. DPR 30 Marzo 2004, “Disposizioni per la prevenzione ed il contenimento dell'inquinamento acustico da rumore prodotto dalle infrastrutture viarie
5. Mauro Strada et al.” Bonifica acustica delle aree adiacenti il tracciato dell'autostrada A4 in localita' Borgoforte” Atti del 4° Congresso Nazionale Ciriaf Perugia 2004



## MODELLIZZAZIONE DEL RUMORE DA TRAFFICO AEROPORTUALE: L'AEROPORTO CRISTOFORO COLOMBO DI GENOVA

Alberto Baudà<sup>1</sup>, Davide Borelli<sup>1</sup>, Andrea Marinoni<sup>1</sup>, Corrado Schenone<sup>2</sup>

<sup>1</sup>D.I.M.S.E.T., Dipartimento di Macchine, Sistemi Energetici e Trasporti, Via Montallegro 1, Genova

<sup>2</sup>D.I.P.T.E.M., Dipartimento di Ingegneria della Produzione, Termoenergetica e Modelli Matematici,  
Via all'Opera Pia 15, Genova

### SOMMARIO

Il presente lavoro descrive la modellizzazione del rumore da traffico aeroportuale associato alla operatività dell'aeroporto Cristoforo Colombo di Genova. La modellizzazione è stata condotta mediante codici di calcolo commerciali quali AEM (Area Equivalent Method, versione 6.0c), utile nel determinare preliminarmente la necessità di uno studio completo relativo all'inquinamento acustico aeroportuale data una variazione del traffico, INM (Integrated Noise Model, versione 6.1) ed HNM (Heliport Noise Model, versione 2.2). I risultati forniti dai codici di calcolo sono stati quindi validati mediante il confronto con i dati ottenuti da rilevamenti fonometrici effettuati in zone prossime all'aeroporto e all'interno del sedime aeroportuale stesso.

Ottenuti da ENAV i tabulati del traffico aeroportuale, si sono quindi condotte simulazioni previsionali relative al rumore nell'intorno aeroportuale nelle attuali condizioni di traffico e nelle condizioni di traffico previste dal Piano di Sviluppo Aeroportuale per l'anno 2010. Si è prodotta infine una classificazione acustica rispondente ai criteri definiti dal D.M. 31 ottobre 1997 analizzando i diversi insediamenti e le relative caratteristiche e sovrapponendovi infine gli output combinati ottenuti relativi allo stato attuale e alla previsione al 2010. Un'ulteriore analisi previsionale ha riguardato l'ipotesi dello spostamento al largo dell'aeroporto formulata dal Renzo Piano Building Workshop.

### 1. INTRODUZIONE

La progressiva apertura delle frontiere tra gli Stati porta con sé una costante crescita degli scambi e quindi dei trasferimenti di beni e persone. Sulle lunghe distanze questi avvengono quasi esclusivamente con la modalità aerea, ma anche sulle piccole distanze tale modalità è ormai spesso conveniente, grazie anche alle politiche di "deregulation", che, eliminando i monopoli e aprendo il mercato alla concorrenza, hanno fatto sì che le tariffe siano diminuite [1].

L'aumento di traffico aereo presuppone la costruzione di nuovi aeroporti e l'ampliamento degli esistenti per soddisfare la crescente domanda non solo di passeggeri, ma anche di merci. Questo porta, nel caso di un nuovo aeroporto, ad una difficile scelta di collocazione, soprattutto in territori come quello italiano dove la morfologia del terreno è articolata e la densità di popolazione è alta; nel caso di un aeroporto esistente si va invece ad aggravare problemi già esistenti.

L'approccio corretto consiste, pertanto, in una razionale pianificazione degli aeroporti e del loro inserimento nel territorio: si dovrà quindi cercare di valutare il maggior numero di alternative possibili e le diverse variabili in gioco, utilizzando allo scopo programmi informatici e simulatori. In questo modo verrà valutato, e quindi minimizzato, anche il problema dell'inquinamento acustico che costituisce la limitazione ambientale più significativa nella scelta dell'insediamento di un nuovo aeroporto e nello sviluppo di quelli esistenti [2, 3]: partendo da dati effettivi sarà possibile tracciare le curve di isolivello attuali e quelle a saturazione.

L'impiego di modelli matematici previsionali dell'inquinamento da rumore del traffico aereo risulta dunque uno strumento indispensabile per una molteplicità di scopi connessi con il controllo dell'impatto ambientale negli insediamenti urbani.

### 2. L'AEROPORTO C. COLOMBO DI GENOVA

#### Dati generali dello scalo

L'aeroporto internazionale di Genova "Cristoforo Colombo" è uno dei principali scali italiani relativamente al traffico nazionale e per quello riguardante i paesi dell'Unione Europea, abilitato sia al traffico IFR che VFR. Inoltre, funge da supporto per tutti gli aeroporti dell'Italia settentrionale nel caso di condizioni meteorologiche avverse (generalmente in caso di nebbia).

L'aeroporto di Genova ha una collocazione assolutamente particolare, in effetti esso si trova all'interno dell'area urbana del Comune di Genova a pochi chilometri dal centro cittadino ma, essendo stato ricavato sul mare, in posizione defilata rispetto alle aree abitate. L'area aeroportuale sorge tra le delegazioni cittadine di Cornigliano, Sestri e Pegli. Queste aree presentano, da un punto di vista socio-urbanistico caratteri molto variegati che, nel tempo si sono sovrapposti e che oggi coesistono in maniera spesso conflittuale.

La fascia costiera è caratterizzata da una forte presenza di edifici residenziali ma essa ospita anche:

1. la linea ferroviaria Genova - Ventimiglia;
2. lo scalo ferroviario di Genova Sestri;
3. l'autostrada A10 Genova - Ventimiglia;
4. l'unica direttrice di traffico, non autostradale, che collega il Ponente cittadino con il Centro;
5. un tratto del Porto di Genova
6. il polo industriale di Cornigliano con la presenza delle acciaierie,
7. il Porto Petroli,
8. i cantieri navali di Sestri Ponente;

9. il VTE (Voltri Terminal Europa) con il suo scalo ferroviario.

Da questo sintetico elenco appare evidente come il contesto territoriale in cui si è sviluppato l'aeroporto di Genova sia molto complesso e come la presenza di sorgenti di rumore concorrenti sia notevole.

### Sentieri di decollo ed atterraggio

A causa della sua particolare disposizione, l'approccio all'aeroporto avviene secondo un unico sentiero di avvicinamento, che coincide con la direttrice congiungente il Monte di Portofino con la pista dell'aeroporto con un angolo di circa 3°, utilizzando la pista 29. Questo sentiero è utilizzato per circa il 90% degli atterraggi. Quando le condizioni del vento non lo permettono, viene utilizzata come alternativa per la sola procedura di decollo la pista 11, in quanto non è possibile per aeromobili dell'aviazione commerciale effettuare gli atterraggi lungo tale pista a causa della vicinanza delle colline. Questo secondo sentiero di discesa (da ovest verso est) è utilizzato nel 10% dei casi circa e comunque solo per l'aviazione generale.

Le traiettorie di decollo e atterraggio dipendono dal tipo di velivolo; per questo aspetto si è fatto riferimento alla banca dati di INM. Comunque tutti i velivoli hanno in comune una virata verso Sud effettuata alla fine della fase di decollo.

### Caratteristiche Tecniche

Le caratteristiche tecniche dello scalo ligure sono sinteticamente riassunte in Tab. 1.

Tabella 1: Caratteristiche tecniche dello scalo aereo genovese.

Indicatore di località	LIMJ/GOA
Coordinate ARP	WGS84: Latitudine 44°24'48" N Longitudine 008°50'15" E
Direzione e distanza dalla città	4 NM (7.4 Km) Ovest
Elevazione di riferimento	13 FT (4 m)
Temperatura di riferimento	27.5 C°
Codice di riferimento pista	4E
Categoria antincendio	8° ICAO
Designazione piste	11/29
Orientamento magnetico	104°/ 284°
Dimensioni piste (m)	2915 x 45
Tipo di superficie	Conglomerato bituminoso
Resistenza	PCN 69/F/A/W/T
Pista di rullaggio	Lunghezza 1940 Larghezza 30
Superfici piazzali di sosta	Aviazione commerciale: 200.000 m <sup>2</sup> Aviazione generale: 75.000 m <sup>2</sup>

## 3. MODELLIZZAZIONE DEL RUMORE AEROPORTUALE

La modellizzazione del rumore aeroportuale per lo scalo Cristoforo Colombo è stata condotta mediante i codici di calcolo ufficiali della Federal Aviation Administration

statunitense, sicuramente i più diffusi e testati a livello mondiale. Modelli fisici per valutare l'inquinamento acustico in un aeroporto sono stati sviluppati a partire dagli anni Settanta. Infatti nel 1971 la SAE (Society of Automotive Engineers, USA) pubblica il rapporto ARP 1114, seguito nel 1981 dal rapporto SAE-AIR-1751 e nel 1986 dal rapporto SAE-AIR-1845, in cui si sviluppano modelli e specifiche a riguardo. Quest'ultimo rapporto condivide molti punti con il Documento 29 dell'ECAC (European Civil Aviation Conference) [4, 5] e con la Circolare 205 dell'ICAO (International Civil Aviation Organization) [6]. Inoltre, a livello nazionale, è stato riconosciuto dall'ANPA (Agenzia Nazionale Protezione Ambiente) come modello di calcolo utilizzabile per i lavori di tutte le Commissioni aeroportuali [7].

Nel 1977 FAA (Federal Aviation Administration) implementò il modello di calcolo SAE in forma di codice numerico, pubblicando la prima versione del simulatore INM (Integrated Noise Model). Tale codice è stato più volte revisionato, con l'introduzione di algoritmi di calcolo e dati relativi alle caratteristiche acustiche degli aerei e dell'ambiente sempre più precisi [8].

### AEM (Area Equivalent Method) versione 6.0c

AEM (Area Equivalent Method) consiste in una procedura di screening usata per determinare la necessità di ulteriori analisi con INM (Integrated Noise Model).

AEM, la cui prima versione di risale al 1984, fornisce una stima del cambiamento delle curve di isolivello sonoro di un aeroporto in seguito ad una variazione di traffico, dati i tipi di velivolo ed il numero di operazioni per ogni velivolo [9]. In particolare, AEM calcola l'area (in miglia quadrate) contenuta dalla curva isolivello a 65 dB(A). L'indice di valutazione usato è il L<sub>DN</sub> (Day-Night average sound Level), definito come:

$$L_{DN} = 10 \log \left[ \frac{15}{24} 10^{\frac{LD}{10}} + \frac{9}{24} 10^{\frac{LN+10}{10}} \right] \text{ (dB)} \quad (1)$$

dove L<sub>D</sub> è il livello equivalente continuo diurno e L<sub>N</sub> quello notturno (tra le ore 22.00 e le 07.00) penalizzato di 10 dB.

Il software usa una procedura di screening del rumore della Civil Aeronautics Board (CAB) statunitense, che stabilisce un cosiddetto "criterio di aumento" del 17% dell'area contenuta dalla curva di isolivello sonoro dei 65 dB(A), che, in termini di livello di rumore dell'aeroporto, si traduce mediamente nell'aumento di circa 1.5 dB(A) del livello stesso. Se quindi la differenza dovuta ad un cambiamento di traffico è inferiore al 17% nessun altro studio è necessario, altrimenti c'è la necessità di un ulteriore studio accurato con INM.

AEM rappresenta quindi l'informatizzazione della procedura CAB sotto forma di un foglio di calcolo Microsoft EXCEL 97/2000 e determina l'area delle curve L<sub>DN</sub> in miglia quadrate per un mix assegnato del parco aeromobili ed un certo numero di velivoli, usando regressioni lineari che pongono l'area della curva di rumore L<sub>DN</sub> come funzione del numero di operazioni giornaliere medie annue. I parametri di AEM derivano direttamente da INM e sono generati per ogni velivolo; un processo sviluppato da una procedura CAB consente ad AEM di sommare le aree prodotte dai singoli velivoli allo scopo di ottenere un contorno singolo per l'aeroporto in esame.

Dal punto di vista operativo, dopo aver indicato il valore L<sub>DN</sub> delle curve di isolivello richieste, si è passati ad eseguire

un conteggio (comprensivo di eventuali sostituzioni) di tutti gli aerei transitati nell'arco del giorno di riferimento che, nell'ambito dello studio è stato l'8 luglio 2005. Rispetto a tale condizione si è ipotizzato un incremento del traffico del 20%, così come stimato dal Piano di Sviluppo Aeroportuale [10] per il periodo che va fino al 2010, e si è valutata, con AEM, la necessità di procedere ad una nuova valutazione dell'impatto acustico dell'aeroporto.

- altitudine e temperatura dell'eliporto;
- definizione dell'eliporto;
- definizione degli elicotteri;
- profili d'atterraggio;
- profili di decollo;
- profili di sorvolo;
- descrizione delle traiettorie d'atterraggio e relative operazioni;
- descrizione delle traiettorie di decollo e relative operazioni;
- descrizione delle traiettorie di sorvolo e relative operazioni.

Inseriti questi dati nel software, si sono potuti ottenere output grafici e testuali; per ottenere correttamente le informazioni relative agli atterraggi è stato tuttavia necessario post-processare i files creati dall'interfaccia utente di HNM, saltando il passaggio dell'UI (User Interface).



**Federal Aviation Administration**  
Office of Environment and Energy  
[www.aee.faa.gov/noise/aem.htm](http://www.aee.faa.gov/noise/aem.htm)



### Area Equivalent Method (AEM) Version 6.0c

Airport Name/Code: GOAILMJ

DNL (dBA)	Baseline Area (sq. mi.)	Alternative Area (sq. mi.)	Change in Area (sq. mi.)
65	1,2	1,4	20,3%
70	0,5	0,6	19,0%
75	0,2	0,2	17,9%
80	0,1	0,1	17,0%
85	0,0	0,0	16,2%
90	0,0	0,0	15,6%

Aircraft Type	BASE Case		ALTERNATIVE Case	
	Daytime LTO Cycles	Nighttime LTO Cycles	Daytime LTO Cycles	Nighttime LTO Cycles
Z2ZQE	2,00		2,40	
Z3Z40Q	3,00		3,60	
Z3Z700	6,00		7,20	
Z3ZN1Z	13,00		15,60	
BAE146	4,00		4,80	2,00
BEC58P	2,00		2,40	
CL601	6,00		7,20	
CNA172	2,00		2,40	
CNA500	1,00		1,20	
CNA750	2,00		2,40	
DHC8	12,00		14,40	
DHC8	6,00		7,20	
EMB145	2,00		2,40	
CASEPV	18,00		21,60	
GV	1,00		1,20	
HS748A	8,00		9,60	
LEAR35	3,00		3,60	
MD82	10,00	2,00	12,00	2,40
MU3001	4,00		4,80	
Total LTO's	105,00	2,00	126,00	4,40

### INM (Integrated Noise Model) versione 6.1

Integrated Noise Model è il codice di calcolo più diffuso per la modellizzazione del rumore aeroportuale ed è utilizzato, nella versione 6.1, da più di 700 organizzazioni in ben 50 Paesi. Già dall'uscita di INM 6.0 nel Settembre 1999, la FAA, con la collaborazione del Dipartimento dei Trasporti americano e il Volpe Center, introdusse la possibilità di utilizzare lo spettro in terzi di ottava per ogni aeromobile. Questo permette di valutare l'assorbimento atmosferico e di utilizzare il livello sonoro ponderato C. Il modello è usato principalmente per scopi di pianificazione degli usi del territorio, per studi di impatto ambientale e per valutazioni della rumorosità indotta in insediamenti abitativi nei casi di nuovi aeroporti, nuove piste, aumenti di traffico e modifiche alle traiettorie e alle procedure.

I dati di ingresso riguardano l'aeroporto e le condizioni operative dei velivoli.

Per l'aeroporto sono necessarie le seguenti informazioni:

- quota dell'aeroporto sul livello del mare;
- temperatura giornaliera su media annuale;
- pressione atmosferica su media annuale.

Per gli aeromobili sono necessarie le seguenti informazioni:

- tipo e versione dell'aereo;
- tipo dell'operazione: decollo, atterraggio, touch-and-go, sorvolo, rullaggio;
- numero delle operazioni di volo in ciascun giorno per i due periodi, diurno e notturno;
- dati Rumore - Potenza - Distanza NPD (Noise Power Distance);
- traiettoria tridimensionale seguita dall'aeromobile.

Grazie alla collaborazione offerta dall'Ufficio Tecnico della società che gestisce l'aeroporto, è stato possibile ottenere, da parte di ENAV, i dati necessari relativi al traffico aereo e alcuni studi precedenti riguardanti l'impatto acustico dell'aeroporto sul territorio. All'ENAV sono stati reperiti i dati del traffico relativi alle date in cui sono state effettuate le tre rilevazioni che si descriveranno nel seguito e quelli riguardanti il giorno più trafficato dell'anno 2005, identificato nel giorno 8 Luglio, considerato "giorno critico" sul quale eseguire la simulazione relativa allo stato attuale.

Si sono quindi preliminarmente generati i files rappresentanti l'elevazione del terreno nella zona circostante l'Aeroporto: è stato necessario ricrearli ex novo poiché INM utilizza un formato proprietario .3cd non distribuito al di fuori degli USA. Inoltre è stato importato previa conversione un file

Figura 1: Output di AEM

Dato che AEM considera nel suo computo tutti i movimenti di ogni singolo aereo come eseguiti su un'unica pista, in un'unica direzione e senza differenziazione tra decolli ed atterraggi, si è provveduto a sommare tutte le operazioni LTO (Landing-Take Off) di ogni velivolo, distinguendo solo tra operazioni notturne e diurne.

AEM non consente, al contrario di INM, la creazione di nuovi aeromobili non contenuti nel database, quindi si è dovuto provvedere a sostituire alcuni di questi con i mezzi più simili disponibili, dal punto di vista della massa e del tipo e numero di motori [9]. AEM non contempla inoltre l'eventualità del computo di elicotteri ma, come mostra Fig. 1, la soglia di incremento del 17% per la curva a 65 dB(A) è stata nettamente sorpassata anche senza tener conto dell'aumento previsto del traffico di elicotteri, indicando così la necessità di una più accurata simulazione con INM ed HNM.

### HNM (Helicopter Noise Model) versione 2.2

Helicopter Noise Model è un programma che serve a valutare l'impatto del rumore dovuto agli elicotteri nelle vicinanze degli eliporti.

La versione attualmente in uso, rilasciata nel 1994, è ormai decisamente obsoleta: nonostante ciò tale programma è ancora considerato ad oggi il migliore (e praticamente l'unico) software di modellizzazione del rumore dovuto agli elicotteri disponibile al pubblico.

I dati richiesti da HNM per poter procedere ad una simulazione sono [11]:

CAD di tipo .dxf da usare come sfondo per rendere più comprensibile l'interpretazione degli output grafici di INM.

Molti aeromobili non erano presenti nel database del software in quanto principalmente afferenti a flotte europee e si è quindi dovuto procedere alla loro "creazione": in particolare sono da notare l'aeromobile FA50, definito secondo le specifiche della FAA, e le sostituzioni per gli aeromobili GLEX, P180 e P166, definiti secondo similitudini di stazza, motori caratteristiche geometriche, eccetera.

Successivamente si è dovuto definire l'indice di valutazione  $L_{VAj}$ , non contemplato nel pur vasto database di INM. Per la definizione di tale indice (Eq. 1), si è dovuta indicare la pesatura in frequenza con filtro A, la tipologia di indice (exposure based) ed i parametri che compaiono nella seguente Eq. 2:

$$LE = 10 \log (W1E1 + W2E2 + W3E3) - 10 \log (T) \quad (2)$$

dove:

LE = l'indice in questione, nel nostro caso  $L_{VAj}$ ;

W1,W2,W3 = le pesature per i periodi diurno, serale e notturno, che, in riferimento alla normativa italiana [12], sono stati assunti pari a: W1=1, W2=1 e W3=10;

E1,E2,E3 = le frazioni di esposizioni al rumore riferite ai suddetti periodi;

$10 \log (T)$  = dieci volte il logaritmo in base 10 del rapporto tra il numero di secondi nelle 24 ore ed un tempo di riferimento, nel nostro caso 1 secondo.

Al termine della fase di modifica del codice, definiti i dati d'ingresso, si è proceduto all'esecuzione delle simulazioni, introducendo una tolleranza pari a 0.1 dB nel grado di definizione delle curve [8].

### Merging finale degli output

Per combinare gli effetti del rumore prodotto da elicotteri ed aeroplani, in modo da avere un unico output, nella versione 6.0c di INM e in quelle successive è presente un programma chiamato HnmGrd.exe, il quale consente di convertire il file binario for22.dat (nel quale sono salvati i livelli di rumore calcolati da HNM) in un file nmplot.grd leggibile da INM, il quale lo combinerà con quello prodotto da lui stesso in un singolo file nmplot.grd, rappresentante la somma logaritmica del rumore prodotto da elicotteri ed aeroplani insieme. Tale file potrà poi essere visualizzato come curva di isolivello sonoro.

## 4. VALIDAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Al fine di verificare l'accuratezza del modello prodotto, si sono condotti rilievi fonometrici nell'intorno aeroportuale, misurando i valori di  $L_{VAj}$  in tre postazioni caratterizzate da una differente posizione relativa rispetto alle piste aeroportuali.

Una prima postazione di misura (Pos. 1) era localizzata in un'area urbana prossima all'aeroporto, distante da esso 1100 m, nel quartiere di Sestri Ponente. Una seconda postazione era situata su un'altura prospiciente la pista aeroportuale, in località Pegli Vetta (Pos. 2), ad una distanza di circa 1700 m dalla pista. Entrambi i luoghi si trovano in posizione dominante verso il mare e quindi verso l'aeroporto, in quanto sul versante sud di due colline a ridosso della costa.

Un terzo rilevamento è stato effettuato all'interno del sedime aeroportuale (Pos. 3), di fronte alla caserma dei Vigili

del Fuoco, in prossimità dell'ARP (Aerodrome Reference Point) della pista. Le tre postazioni di misura sono indicate in Fig. 2.

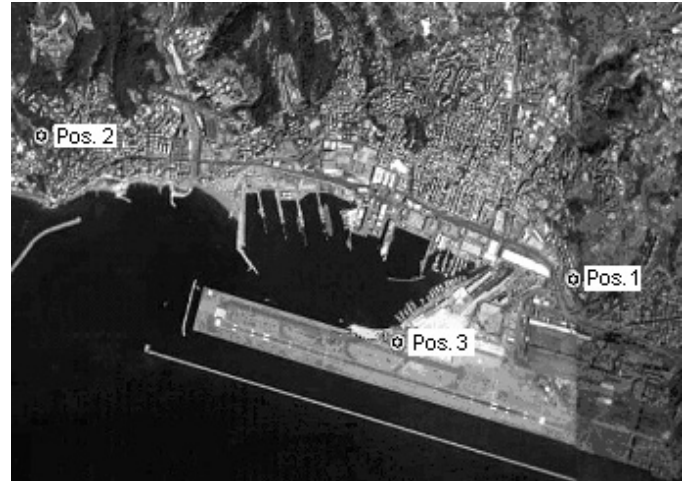


Figura 2: Postazioni di rilevamento fonometrico

La scelta delle postazioni di misura è stata condotta in modo da avere una distribuzione mista sul territorio, sia come direzione, sia come distanza dall'aeroporto, così da ottenere dati significativi di confronto con i risultati dei codici di calcolo INM e HNM ai fini della validazione del modello. Un fonometro-analizzatore è stato utilizzato per misurare il SEL (Sound Exposure Level) corrispondente ad ogni evento sonoro aeroportuale, in modo da poter calcolare i livelli di valutazione del rumore aeroportuale diurno e notturno ( $L_{VAd}$ ,  $L_{VAn}$ ) e quindi il livello di valutazione del rumore aeroportuale totale giornaliero  $L_{VAj}$ , conformemente al D.M. 31.10.1997.

A partire dal SEL di ogni evento registrato, si sono valutati i livelli di valutazione del rumore aeroportuale diurno e notturno ( $L_{VAd}$ ,  $L_{VAn}$ ) mediante le seguenti relazioni:

$$L_{VAd} = 10 \log \left[ \frac{1}{T_d} \sum_{i=1}^{N_d} 10^{\frac{SELi}{10}} \right] \text{ dB(A)} \quad (3)$$

$$L_{VAn} = 10 \log \left[ \frac{1}{T_n} \left( \sum_{k=1}^{N_n} 10^{\frac{SELi}{10}} \right) + 10 \right] \text{ dB(A)} \quad (4)$$

dove:

$T_d$  è la durata del periodo diurno (61200 s);

$N_d$  è il numero totale di operazioni registrate nel periodo diurno;

$T_n$  è la durata del periodo notturno (25200 s);

$N_n$  è il numero totale di operazioni registrate nel periodo notturno.

Il livello di valutazione del rumore aeroportuale totale giornaliero  $L_{VAj}$  riferito a tutte le operazioni nell'arco della giornata dalle ore 00.00 alle ore 24.00, è dato dalla relazione:

$$L_{VAj} = 10 \log \left[ \frac{17}{24} 10^{\frac{L_{VAd}}{10}} + \frac{7}{24} 10^{\frac{L_{VAn}}{10}} \right] \text{ dB(A)} \quad (5)$$

I valori di  $L_{VAj}$  così determinati per le tre postazioni di misura sono stati quindi confrontati con i valori calcolati dal codice di calcolo, per le stesse condizioni di traffico

aeroportuale.

Un primo confronto ha evidenziato scarti di una certa entità tra valori numerici e dati misurati. Si sono quindi introdotti nel codice di calcolo una serie di correzioni, al fine di tarare il modello stesso sulla base dei dati sperimentali.

Innanzitutto si sono definite in termini via via più esatti rispetto ai primi tentativi le caratteristiche dei velivoli non inclusi nel database originale di INM, che presenta un alto livello di definizione per gli aerei statunitensi, ma non contiene le caratteristiche di emissione, ad esempio, di aerei europei come i Piaggio P180 e P166 o il Dassault Falcon 50.

Gli aggiustamenti condotti in tale senso hanno prodotto lievi miglioramenti, ma i livelli di rumore simulati non si discostavano sensibilmente dai risultati precedenti.

Tabella 2: Confronto dei risultati dei rilevamenti con i risultati dei codici di calcolo INM e HNM in termini di  $L_{VAj}$

$L_{VAj}$ dB(A)	POS. 1 Via dell'acciaio 13 luglio	POS. 2 Pegli Vetta 14 luglio	POS 3 Aeroporto 20 luglio
<b>Risultati rilevamenti fonometrici</b>	48.3	53.1	66.2
<b>Risultati codici di calcolo</b>	48.5	52.3	65.9

A questo punto si è supposto che la scarsa accuratezza non dipendesse dalla caratterizzazione degli aerei non presenti nel database, quanto piuttosto dalla non corretta attribuzione di un modello agli aerei che vi erano invece rappresentati. In altri termini, si è guardato con più attenzione alle corrispondenze stabilite tra gli aerei in decollo e atterraggio e quelli proposti dal database: ad esempio, l'aereo che aveva compiuto il maggior numero di operazioni nei giorni dei rilevamenti, il Boeing 737, è in effetti presente nel database di INM ben cinque volte, a seconda delle diverse versioni e motorizzazioni. In assenza di informazioni a proposito nei dati raccolti e trasmessi da ENAV, all'inizio si era scelto come rappresentativo il modello 737D17; in seguito si è passati al 737222 e, infine, al 737N17, con il quale si è riscontrato un notevole miglioramento della accuratezza delle simulazioni.

Dopo l'affinamento del modello così condotto, si sono ottenuti dal merging dell'output dei codici INM e HNM i risultati riportati in Tab. 2 e, ad esempio per il 20 luglio, in Fig. 3. Come appare dall'osservazione della tabella, in cui i dati ricavati dai rilievi fonometrici sono confrontati con quelli ottenuti dalle simulazioni, i risultati sono molto simili, confermando così la accuratezza della modellizzazione condotta.

## 5. RISULTATI E DISCUSSIONE

Si sono condotte una serie di simulazioni previsionali relative al rumore nell'intorno aeroportuale nelle attuali condizioni di traffico e nelle condizioni di traffico previste dal Piano Regolatore Aeroportuale per l'anno 2010. La modellizzazione ha consentito di estendere l'analisi dell'impatto acustico dell'aeroporto a tutte le aree interessate e di estendere lo studio a diversi scenari futuri, prendendo in esame l'evoluzione del traffico aereo e scelte urbanistiche attualmente in discussione.

Nella valutazione riferita allo stato attuale, si sono utilizzati i dati di traffico aeroportuale, forniti dall'ENAV, relativi a tre giornate appartenenti, una per ciascuno, ai periodi 1 ottobre – 31 gennaio, 1 febbraio – 31 maggio e 1 giugno – 30 settembre, così come previsto dal D. M. 31.10.1997. I risultati sono riportati in Fig. 4.

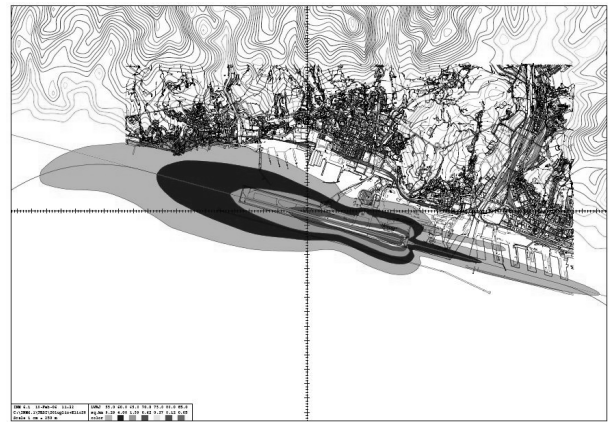


Figura 3: Curve isolivello relative al giorno 20 luglio 2005 (scala originale 1:25000)

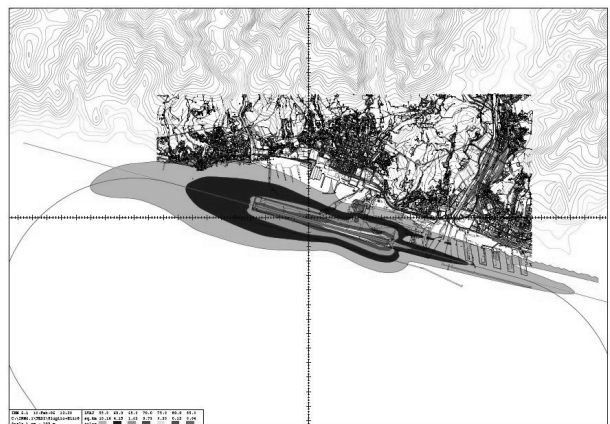


Figura 4: Curve isolivello relative allo stato attuale dell'aeroporto (scala originale 1:30000)

La modellizzazione ha confermato quanto già noto al gestore aeroportuale: i livelli di rumore sono piuttosto contenuti sia in virtù della posizione dell'aeroporto e dei corridoi di decollo e atterraggio, che incidono sull'area marina antistante la costa o su aree ad esclusivo uso portuale o industriale, sia a causa del traffico relativamente contenuto che gravita sull'aeroporto C. Colombo. Il limitatissimo numero di esposti e lamentele da parte della cittadinanza è conseguenza di tale fortunata localizzazione dell'aeroporto, prossimo al centro città, ma sufficientemente distante dalle aree costiere urbanizzate.

Si è quindi modellizzato il rumore prodotto dal traffico aeroportuale nelle condizioni previste per il 2010, nell'ipotesi, propria del Piano di Sviluppo Aeroportuale, di un incremento del traffico a tale data pari al 20% rispetto allo stato attuale. Fig. 5 mostra il risultato delle simulazioni in forma grafica. Visti i contenuti livelli sonori propri della condizione attuale, anche a fronte di un incremento sensibile dei traffici, i livelli di rumore in corrispondenza dei ricettori continuano ad essere del tutto accettabili.

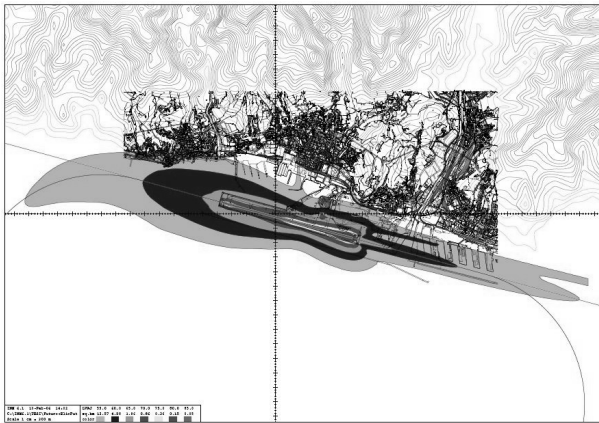


Figura 5: Proiezione futura a breve termine (anno 2010, scala originale 1:30000)

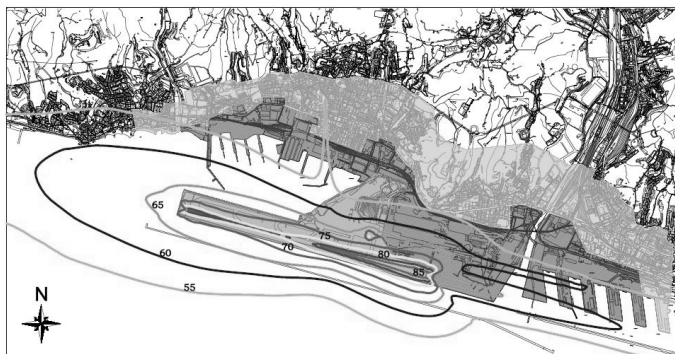


Figura 6: Sovrapposizione tra lo scenario futuro al 2010 e la zonizzazione acustica aeroportuale ipotizzata (scala originale 1:25000)

Poiché ad oggi non è stata ancora adottata una zonizzazione acustica aeroportuale delle aree circostanti l'aeroporto, si è prodotta una classificazione acustica rispondente ai criteri definiti dal D.M. 31 ottobre 1997 analizzando i diversi insediamenti e le relative caratteristiche e sovrapponendovi infine gli output combinati ottenuti rispetto allo stato attuale e alla previsione al 2010 (Fig. 6). Il confronto ha indicato il rispetto dei valori limite di rumore ipotizzati sia nello stato attuale, sia nello scenario futuro.

In Fig. 7 è infine rappresentata la situazione ipotizzata dal Renzo Piano Building Workshop per la futura risistemazione del waterfront, che prevede lo spostamento dell'aeroporto su un'isola artificiale circa 790 metri più al largo, con il corrispondente aumento del traffico aereo di circa il 30% rispetto alla condizione attuale. La simulazione indica una riduzione dei livelli sonori in corrispondenza delle aree urbanizzate rispetto alla attuale localizzazione e permette pertanto di stimare che anche incrementi di traffico che superino quello previsto potranno essere accolti dall'aeroporto senza che i livelli di rumore associati alla operatività dello scalo eccedano i valori limite di legge e, soprattutto, arrecando un disturbo alla cittadinanza comunque tollerabile.

## 6. CONCLUSIONI

La compatibilità tra il traffico aereo ed il territorio presuppone la preventiva valutazione degli effetti del rumore come forma di inquinamento delle aree contigue agli aeroporti

al fine di inquadrare tali effetti nel rispetto dei valori ambientali del comprensorio servito e di assicurare la compatibilità fra aeroporto e ambiente.

I codici di simulazione utilizzati attualmente non consentono in generale un approccio dei più amichevoli, in quanto essi non sono pensati e sviluppati per utenti non statunitensi: sono previsti quindi database che scarseggiano degli aerei principalmente presenti nelle flotte europee. Inoltre esiste il problema della estrema difficoltà di importare files di elevazione del terreno nel particolare formato proprietario .3cd esistente solo per aree nordamericane. Non sono valutati, infine, dai suddetti codici di calcolo gli indici di valutazione  $L_{VAd}$ ,  $L_{VAn}$  e  $L_{VAj}$  previsti dalle norme comunitarie e nazionali. L'adeguamento agli standard europei di tali modelli è un'operazione indispensabile per avere simulazioni più accurate e rappresentative dell'impatto acustico dovuto al traffico aeroportuale.

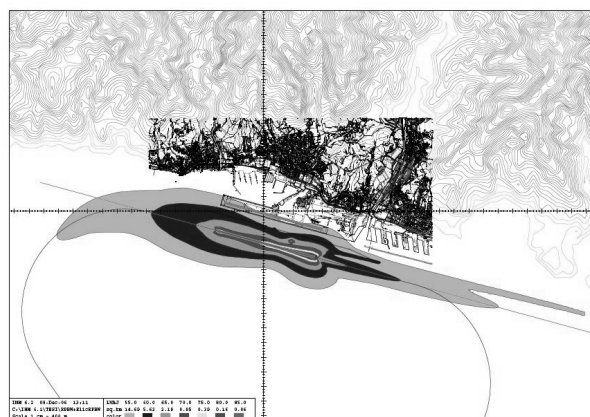


Figura 7: Ipotesi Renzo Piano Building Workshop (scala originale 1:40000)

La modellizzazione del rumore da traffico aeroportuale per l'aeroporto C. Colombo di Genova ha indicato da una parte la necessità di una attenta taratura del modello numerico mediante il confronto con dati misurati, dall'altra l'efficacia dei codici di calcolo nella analisi del clima acustico nell'intorno aeroportuale, sia in termini di analisi dettagliata sul territorio degli effetti prodotti, sia di valutazione previsionale rispetto a scenari futuri.

Nello specifico, il rumore associato allo scalo genovese è risultato relativamente contenuto sia nelle condizioni attuali, sia a fronte di una crescita del traffico aereo del 20% nei prossimi anni. Inoltre è risultata decisamente migliorativa l'ipotesi di uno spostamento dell'aeroporto di circa 790 metri più al largo, che permetterebbe un'ulteriore crescita dei movimenti con livelli di rumore compatibili con i valori limite di legge e con un accettabile disturbo alla popolazione esposta.

## BIBLIOGRAFIA

1. G. Sciutto e M. Galaverna, Tecnologie dei trasporti e territorio, SCIRO, 2000.
2. R. Passatore, F. D'Amico e D. Maffeo, Rumori degli aerei e tutela dell'ambiente, S.A.G.A.T., 1993.
3. K. McK. Eldred, Airport Noise, in M. J. Crocker (ed.), Handbook of Acoustics, chap. 70, John Wiley & Sons, Inc., Toronto, 1998.

4. ECAC.CEAC Doc. 29: Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, European Civil Aviation Conference, terza ed., Dic. 2005.
5. ECAC.CEAC Doc. 29R: Methodology for Computing Noise Contours around Civil Airports, European Civil Aviation Conference, Maggio 2004.
6. Circular 205 - Recommended Method for Computing Noise Contours around Airports: AN/1/25, ICAO, 1988.
7. Agenzia Nazionale Protezione Ambiente, nota prot. N.6117 del 15 marzo 2001.
8. Gulding, Olmstead, Roof, Fleming, Rapoza e Gerbi, INM - Integrated Noise Model version 6.0 technical manual, FAA, Settembre 1999.
9. Autori vari: AEM - Area Equivalent Method version 6.0c, F.A.A., Novembre 2001.
10. Società Aeroporto di Genova S.p.A. Piano di Sviluppo Aeroportuale, 2002.
11. Fleming e Rickley, HNM - Heliport Noise Model version 2.2 user's guide, F.A.A., Febbraio 1994.
12. G. Brambilla, I decreti sul rumore aeroportuale – Analisi delle diverse procedure operative, CNR, Roma, 2000



## **PUBBLICAZIONE IN RETE DELLE CLASSIFICAZIONI ACUSTICHE DEI COMUNI DELLA PROVINCIA DI ROMA**

Patrizia Prignani<sup>1</sup> e Andrea Venditti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Servizio Tutela Aria ed Energia, Provincia di Roma, Via Tiburtina n° 691, Roma

<sup>2</sup>Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Roma “La Sapienza”, Via Eudossiana n° 18, Roma

### **SOMMARIO**

La Provincia di Roma, in collaborazione con il Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma “La Sapienza”, ha concluso la prima fase del progetto per l'informatizzazione e la consultazione del pubblico, tramite il sito internet della Provincia, delle classificazioni acustiche dei territori Comunali della Provincia di Roma.

La rilevanza di tale progetto discende anche dalla necessità di ottemperare alla numerosa normativa che impone alle Pubbliche Amministrazioni di rendere di dominio pubblico i dati ambientali a propria disposizione.

Prima di tale fase la Provincia di Roma, sempre in collaborazione con il Dipartimento di Fisica Tecnica, ha messo appunto una metodologia per il controllo delle classificazioni acustiche presentate dai Comuni del proprio territorio.

Nella memoria viene illustrata la metodologia di verifica messa a punto per la verifica dei piani di zonizzazione e la metodica seguita per la razionalizzazione delle classificazioni acustiche per la realizzazione della web-application che consente l'informazione del pubblico.

### **PREMESSA**

Il Servizio Tutela Aria ed Energia della Provincia di Roma, sensibile agli aspetti di inquinamento acustico, ha finanziato un assegno di ricerca finalizzato alla pianificazione e risanamento acustico del proprio territorio.

I responsabili scientifici di tale progetto sono: per il Dipartimento di Fisica Tecnica il prof. Massimo Coppi; per la Provincia di Roma la dott.ssa Patrizia Prignani. Il vincitore dell'assegno di ricerca è l'ing. Andrea Venditti.

In tale ambito la Provincia di Roma, in collaborazione con il Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma “La Sapienza”, ha avviato un progetto per la pubblicazione, l'informazione e la consultazione via internet, delle classificazioni acustiche dei territori comunali di competenza della Provincia.

Il progetto è finalizzato ad assicurare l'informazione e la partecipazione del pubblico sui temi ambientali, in particolare per la tutela dall'inquinamento acustico.

Tale iniziativa si inquadra anche nelle linee di indirizzo del Decreto Legislativo n. 194 del 2005, il quale, all'articolo 8, stabilisce che l'informazione è resa accessibile dall'autorità pubblica anche avvalendosi delle tecnologie di telecomunicazione informatica disponibili.

In tal senso, il progetto posto in atto dalla Provincia di Roma, si identifica come un progetto pilota per una risoluzione programmata e sostenibile dei problemi ambientali anche nella prospettiva della consultazione delle mappature acustiche e delle mappe acustiche strategiche con il nuovo descrittore  $L_{den}$  e l'adozione dei piani di azione.

Inoltre, sempre nell'ambito della collaborazione tra la Provincia di Roma e il Dipartimento di Fisica Tecnica, è stata messa a punto una metodologia di verifica per il controllo della congruità dei vari piani presentati rispetto a quanto

previsto dalla normativa vigente, al fine di predisporre un indirizzo comune di tutela del territorio per le varie amministrazioni comunali della Provincia di Roma.

### **QUADRO NORMATIVO REGIONALE**

Come stabilito dall'art. 4 della Legge quadro 447/95, la Regione Lazio ha emanato la legge in cui vengono definiti i criteri in base ai quali i Comuni procedono alla classificazione acustica del proprio territorio.

In particolare le competenze degli enti locali in materia di inquinamento acustico sono regolate dalla Legge Regionale 14 del 1999, così come integrata dalla Legge Regionale 18 del 2001, che detta disposizioni in materia di inquinamento acustico per la pianificazione ed il risanamento del territorio.

Ai Comuni spetta il compito di classificare in zone acustiche il proprio territorio ed eventualmente provvedere all'adozione dei piani di risanamento acustico.

La Legge Regionale n. 18, del 3/Agosto/2001, stabilisce per le Province le seguenti competenze:

- 1) il controllo e la vigilanza in materia di inquinamento acustico, in ambiti territoriali ricadenti nel territorio di più comuni;
- 2) la gestione dei dati di monitoraggio acustico forniti dall'Agenzia regionale per la protezione ambientale del Lazio (ARPA);
- 3) la verifica del coordinamento degli strumenti urbanistici comunali con la classificazione in zone acustiche del territorio comunale;
- 4) la valutazione dei piani di risanamento acustico comunali e la formulazione, sulla base degli stessi, di proposte alla Regione ai fini della predisposizione del piano regionale;

- 5) la verifica dell'adeguamento dei piani di risanamento comunali sulla base dei criteri contenuti nel piano regionale;
- 6) il coordinamento delle azioni di contenimento del rumore attuate dai comuni, nei casi di inquinamento acustico che riguardino aree ricadenti nel territorio di più comuni;
- 7) l'emanazione di ordinanze contingibili ed urgenti, con efficacia estesa alla provincia o a parte del suo territorio comprendente più comuni, per il ricorso temporaneo, qualora sia richiesto da eccezionali ed urgenti necessità di tutela della salute pubblica o dell'ambiente, a speciali forme di contenimento o di abbattimento delle emissioni sonore, inclusa l'inibitoria parziale di determinate attività.

La stessa Legge Regionale fissa un limite temporale, prorogato fino al 31 maggio del 2004, per l'adozione dei piani comunali di zonizzazione acustica e prevede sanzioni fino a 50.000,00 euro per gli inadempienti. Poiché la zonizzazione acustica è un allegato al piano regolatore, risulta evidente l'importanza di tale mandato.

## **METODOLOGIA DI VERIFICA E CONTROLLO DELLE CLASSIFICAZIONI ACUSTICHE**

Con riferimento alla Legge quadro sull'inquinamento acustico, ai suoi regolamenti attuativi, al D.P.C.M. 14/11/1997 e ai criteri generali in base ai quali i comuni procedono alla classificazione acustica del proprio territorio introdotti dalla Legge della Regione Lazio n. 18 del 3/agosto/2001, è stata stabilita una metodologia di verifica per il controllo della congruità dei vari piani presentati.

Va premesso che il piano di zonizzazione acustica non è la redazione dello stato di fatto, non fotografa solo la situazione attuale, ma deve stabilire un rapporto con gli scenari di assetto futuro del territorio. Tale assetto futuro non può essere meglio rappresentato che dagli strumenti urbanistici generali ed attuativi. Dallo stato di fatto si deve partire, ma il piano rappresenta una sorta di "piano regolatore acustico" che traccia gli indirizzi ambientali dettati dalla politica ambientale dei vari Comuni. Proprio da un confronto tra il piano di zonizzazione acustica e lo stato di fatto si individuano, eventualmente, i piani di risanamento acustico comunali.

In primo luogo i piani di zonizzazione devono contenere i seguenti requisiti minimi:

- una relazione esplicativa del processo progettuale che ha portato all'elaborazione del Piano di Classificazione Acustica, nella quale dovrà essere dimostrata la compatibilità con il Piano Urbanistico vigente, ovvero in adozione;
- le mappe tematiche utilizzate per l'elaborazione del PCA, come per esempio indicatori socio economici ricavati dai dati ISTAT, infrastrutture di trasporto, Piano Urbanistico, ecc.;
- le destinazioni d'uso attuali e/o previste dagli strumenti urbanistici generali;
- i risultati di eventuali campagne di misura predisposte per la lettura del territorio;
- eventuale Piano Urbano del Traffico;
- per i comuni nel cui territorio ricadono infrastrutture aeroportuali, deve essere dimostrata la compatibilità con l'eventuale zonizzazione aeroportuale (D.M. 31/ottobre/1997).

Inoltre i PCA devono contenere e/o rispettare le seguenti procedure:

- devono essere individuate le aree da destinarsi a spettacolo a carattere temporaneo e le aree di particolare interesse paesaggistico;
- deve essere rispettata la gradualità nell'accostamento delle zone acustiche, anche con i Comuni confinanti;
- nel caso di aree a forte fluttuazione turistica stagionale prevedere la doppia zonizzazione;
- deve essere prevista la classificazione acustica della rete viaria;
- devono essere presentate le cartografie in scala non inferiore a 1:10000 e per le aree urbanizzate in scala da 1:5000 a 1:2000, nonché devono essere seguite le indicazioni grafico cromatiche indicate dalla L.R. n. 18/2001;
- devono essere adeguati i regolamenti locali di igiene e sanità o di polizia municipale, prevedendo apposite norme contro l'inquinamento acustico.

Nelle situazioni in cui ci sia la presenza di zone adiacenti che presentano differenze di limiti assoluti ammessi maggiori di 5 dBA è necessario prevedere degli approfondimenti progettuali nell'ambito del Piano di Risanamento Acustico.

La classificazione acustica delle diverse zone è legata alla effettiva e prevalente fruizione del territorio, tenendo conto delle destinazioni previste da piano regolatore, nonché della situazione topografica.

Nella individuazione delle zone deve essere data priorità alla identificazione delle classi a più alto rischio (V e VI) ed a quella particolarmente protetta (I). In questi casi devono essere prevalenti i criteri di fruizione del territorio e di destinazione di piano regolatore.

Per le altre zone (II, III, IV) si deve tenere conto dei seguenti parametri rappresentativi, in materia di inquinamento acustico, dello stato di antropizzazione di un territorio:

- densità di popolazione;
- presenza di attività commerciali ed uffici;
- presenza di attività artigianali;
- il volume di traffico veicolare;
- esistenza di attività industriali;

I primi quattro parametri sono suddivisi in quattro classi: nulla, bassa, media e alta densità a cui corrispondono i valori 0, 1, 2 e 3 rispettivamente. La somma dei diversi pesi, per i parametri in esame, fornirà un valore a cui sarà in relazione una determinata classe acustica.

Le zone con presenza di piccole industrie e/o le zone con presenza quasi esclusiva di attività terziarie o commerciali, cioè situazioni caratterizzate da intensa attività umana, dovranno essere inserite in classe IV.

## **ANALISI DEI PIANI PRESENTATI**

Precedentemente alla divulgazione delle prescrizioni sui criteri di redazione dei piani da parte della Provincia di Roma, si constatava che spesso, i tecnici competenti che redigevano i piani, non giustificavano la classificazione delle zone in classe II, III e IV, in quanto non parametrizzavano i dati rappresentativi dello stato di antropizzazione del territorio.

Inoltre si osservava che venivano male interpretate le fasce di pertinenza delle infrastrutture ferroviarie e stradali, considerando la fascia di pertinenza un elemento della zonizzazione acustica del territorio e cioè estendendo i limiti

della fascia anche alla rumorosità prodotta dalle altre sorgenti di rumore diverse dalla infrastruttura, mentre le fasce di pertinenza si sovrappongono alla zonizzazione realizzata secondo i criteri di cui alla normativa vigente, venendo a costituire in pratica delle strisce di esenzione relative alla sola rumorosità prodotta dall'infrastruttura, rispetto al limite di zona locale che dovrà essere invece rispettato dall'insieme di tutte le altre sorgenti che interessano tale zona.

Attualmente la redazione dei piani risponde in linea generale ai criteri dettati dall'amministrazione provinciale, in linea a quanto stabilito dalla vigente normativa.

### La problematica delle fasce di pertinenza

Sulla base dell'esperienza acquisita dal Servizio Tutela Aria ed Energia della Provincia di Roma, in merito all'analisi delle classificazioni acustiche presentate dai Comuni e viste le richieste poste dai Tecnici Competenti in Acustica Ambientale, si è constatato la diversa interpretazione della normativa vigente nella redazione dei piani di classificazione acustica, in particolar modo per l'attribuzione dei limiti di rumore nelle aree limitrofe alle infrastrutture di trasporto.

Come è noto i valori limite introdotti dal D.P.C.M. del 14/11/1997 non si applicano all'interno delle fasce di pertinenza acustica, definite per le ferrovie dal D.P.R. n. 459/98 e per le strade nel D.P.R. n. 142/04. Comunque, ai fini della redazione del Piano di Classificazione Acustica, risulta indispensabile tenere in debito conto il contributo delle infrastrutture di trasporto nelle aree limitrofe.

Inoltre all'esterno delle fasce di pertinenza le infrastrutture concorrono al raggiungimento dei limiti assoluti di immissione, mentre all'interno delle fasce di pertinenza, le singole sorgenti sonore diverse dalle infrastrutture, devono rispettare i limiti assoluti di emissione e, nel loro insieme, i limiti di immissione fissati dal D.P.C.M del 14/11/1997.

In alcune Delibere di Giunta Regionale (come ad esempio il D.G.R. della Lombardia n. VII/9776, del 2 Luglio 2002) vengono indicate approfonditamente le modalità operative da seguire per individuare e classificare le zone situate nell'intorno delle infrastrutture; tali zone corrispondono a delle aree di influenza, che non coincidono necessariamente con le fasce di pertinenza acustica introdotte dai D.P.R. specifici.

Prendendo spunto dal D.G.R. della Lombardia, la Provincia di Roma ha redatto una nota con l'obiettivo di dettare un criterio per l'attribuzione delle classi acustiche nelle aree limitrofe alle infrastrutture di trasporto. Tale nota è stata inviata alla Regione Lazio al fine della stesura di una Delibera di Giunta Regionale.

La modalità operativa proposta permetterà di evitare:

- i casi in cui non si tiene conto, nella attribuzione delle classi acustiche, della presenza delle infrastrutture, con l'assegnazione di limiti troppo restrittivi;
- i casi in cui le aree di influenza acustica coincidono con le fasce di pertinenza delle strade, con l'assegnazione di limiti troppo alti;

e di tener in debito conto, nella redazione del piano di classificazione acustica, del contributo delle infrastrutture di trasporto.

## STATO DI ATTUAZIONE DELLE CLASSIFICAZIONI ACUSTICHE DEI COMUNI DELLA PROVINCIA DI ROMA

La legge della Regione Lazio n. 18/01, che disciplina, come già detto, le attività di contenimento dell'inquinamento acustico, indicava, nel 31 maggio 2004, il termine ultimo per l'adozione da parte dei Comuni, dei piani di classificazione acustica.

In realtà, alla scadenza di tale data, solo pochi comuni avevano ottemperato agli obblighi stabiliti attraverso l'adozione definitiva del piano di zonizzazione acustica.

Negli ultimi due anni si è avuto un incremento sostanziale dei Comuni che hanno presentato il piano di classificazione acustica, anche per l'impegno congiunto tra la Regione Lazio e Provincia di Roma mediante note informative e linee guida predisposte dalla Provincia. Inoltre la Provincia di Roma ha attuato una campagna di sensibilizzazione e sostegno nei confronti degli amministratori locali, al fine di fornire metodologie di carattere generale e per stimolare politiche di sviluppo territoriale che tengano conto della necessità di contenere e ridurre l'inquinamento acustico.

In virtù di tale iniziativa, nel territorio provinciale, si sta completando il quadro delle zonizzazioni acustiche e al mese di febbraio 2007, dai dati in possesso alla Provincia di Roma, si può constatare che su 121 Comuni 86 (pari al 71%) hanno redatto almeno la zonizzazione preliminare. Si evidenzia che spesso i Comuni non segnalano l'adozione definitiva della zonizzazione acustica.

Nella tabella 1 si riportano i dati relativi all'adozione delle classificazioni acustiche del territorio della provincia di Roma, distinguendo tra adozione preliminare e definitiva e riportando il numero di Comuni che hanno adottato i regolamenti per l'attuazione della disciplina statale e regionale per la tutela dall'inquinamento acustico, come stabilito dalla Legge quadro 447/95 (art. 6, comma 1, lettera e).

Tabella 1 – Numero di Comuni che hanno adottato la classificazione acustica

ADOZIONE PRELIMINARE		ADOZIONE PRELIMINARE E DEFINITIVA		ADOZIONE REGOLAMENTO	
Numero	% sul totale	Numero	% sul totale	Numero	% sul totale
63	52 %	23	19 %	15	12 %

Dai dati riportati in tabella 1 si può notare che, almeno per le informazioni in possesso della Provincia, solo una piccola percentuale di Comuni ha adottato la zonizzazione definitiva e una percentuale ancora minore ha modificato i regolamenti locali prevedendo apposite norme contro l'inquinamento acustico.

Nella figura 1 viene riportata la cartografia della Provincia, con evidenziato il territorio dei Comuni che hanno adottato la zonizzazione preliminare e/o definitiva.

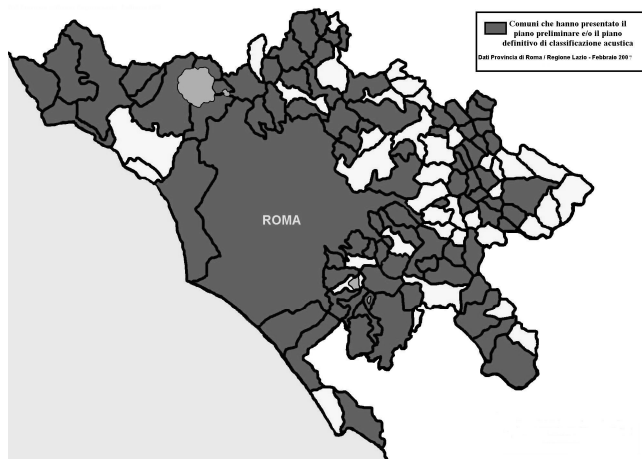


Figura 1 – Cartografia della Provincia di Roma, in verde i territori dei Comuni che hanno adottato la zonizzazione

## IL PROGETTO DI INFORMAZIONE E CONSULTAZIONE DEL PUBBLICO DELLE CLASSIFICAZIONI ACUSTICHE

Come già detto, in ambito regionale la disciplina relativa alla pianificazione e risanamento acustico del territorio è dettata dalla Legge Regionale n. 18 del 2001, che attribuisce:

- ai Comuni il compito della zonizzazione acustica del proprio territorio e successiva redazione del piano di risanamento acustico;
- alle Province la verifica del coordinamento degli strumenti urbanistici comunali con i piani acustici, la valutazione dei piani di risanamento acustico e la formulazione di proposte alla Regione per la predisposizione del piano regionale sulla base della valutazione delle priorità degli interventi.

Dall'analisi della normativa si rileva l'importante ruolo di coordinamento assunto dalle Province ai fini della redazione dei piani di risanamento.

Preso atto della rilevanza di tale ruolo e degli obblighi derivanti dall'art. 8 del D. Lgs. 19/Agosto/2005, n. 194 ("informazione e consultazione del pubblico"), il competente Servizio della Provincia di Roma ha ritenuto opportuno pubblicizzare e rendere disponibile a chiunque ne fosse interessato, i piani comunali di zonizzazione acustica, attraverso la loro pubblicazione sul sito Internet istituzionale.

La rilevanza di tale progetto discende dalla necessità di ottemperare alla numerosa normativa che impone alla P.A. di rendere fruibile a chiunque i dati ambientali a propria disposizione; infatti, oltre al già citato art. 8 del D. Lgs. n. 194/05, è opportuno ricordare le norme di attuazione della Direttiva 2003/4/CE sull'accesso del pubblico all'informazione ambientale di cui al D. Lgs. 195/05, che stabiliscono l'obbligo, per le pubbliche Amministrazioni di "garantire, ai fini della più ampia trasparenza, che l'informazione ambientale sia sistematicamente e progressivamente messa a disposizione del pubblico e diffusa, anche attraverso i mezzi di telecomunicazione e gli strumenti informatici, in forme o formati facilmente consultabili, promuovendo a tale fine, in particolare, l'uso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione".

D'altra parte la Provincia di Roma, aderendo, con una propria A21 Locale, ai principi della carta di Aalborg si è data

delle regole che impongono l'informazione e soprattutto la condivisione delle scelte; riteniamo che nell'ambito della programmazione degli interventi di pianificazione acustica la condivisione è quanto mai opportuna soprattutto ai fini della scelta delle priorità e delle modalità di intervento.

## IL PROGETTO DI INFORMATIZZAZIONE

Il progetto si prefigge di gestire le classificazioni acustiche di tutti i Comuni della Provincia di Roma permettendone la consultazione attraverso Internet.

A tal scopo, i Piani di Zonizzazione Acustica si andranno ad integrare nel portale già esistente della Provincia di Roma ([www.provincia.roma.it](http://www.provincia.roma.it)), del quale andranno a costituire una sezione.

Accedendo alla suddetta sezione, l'utente può visualizzare la classificazione Acustica del Comune prescelto.

Le diverse cartografie che rappresentano i Piani di Zonizzazione Acustica di ciascun Comune sono state archiviate nel sistema sotto forma di immagini.

L'utente, mediante ricerca guidata, può visualizzare tali immagini ed eventualmente stamparle o conservarle sul proprio computer.

Il sistema si basa su una struttura 3-tier ossia un'architettura client-server sviluppata in ambiente *web-based* a tre livelli.

Tale architettura consente lo sviluppo di applicativi *thin-client* ovvero applicativi residenti completamente al di fuori del client (sia come logica applicativa che come interfaccia utente) e che necessitano, per essere utilizzati, esclusivamente di un comune browser Web (Netscape, Explorer, etc.).

Lo sviluppo delle funzionalità avviene in ambiente J2EE (Java 2 Enterprise Edition) e segue i dettami del pattern MVC (Model View Controller).

Il pattern MVC consente di tenere separate le componenti di accesso ai dati (Model), di rappresentazione degli stessi a video (View) e i controlli di navigazione e operativi (Controller).

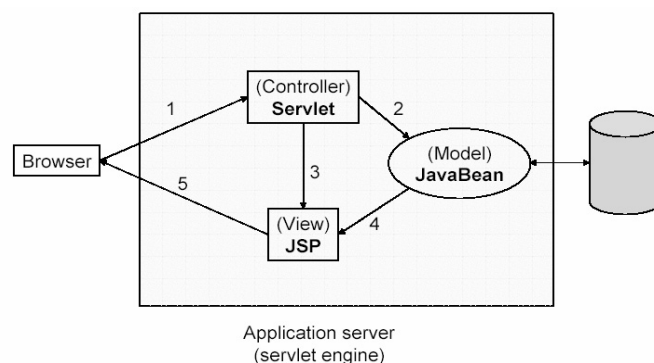


Figura 2 – architettura di una applicazione J2EE sviluppata secondo il pattern MVC

### I diversi livelli di funzionalità

Nel progetto sono stati previsti tre livelli successivi di funzionalità.

I tre livelli di dettaglio previsti, corrispondono ad uno sforzo di implementazione crescente.

- *Ricerca di base* – è possibile scegliere il Piano da visualizzare in base al solo Comune della

Provincia (il Municipio per il Comune di Roma) e navigare all'interno della mappa, tramite spostamenti e zoom, per trovare l'area di interesse;

- *Ricerca guidata* – La scelta potrà essere effettuata mediante una selezione guidata di un determinato numero di focal-point nell'ambito di ciascun Comune (vie o piazze principali, ecc.);
- *Ricerca dettagliata* – La ricerca avverrà mediante l'inserimento del punto ricercato all'interno della mappa (via, piazza, ecc.) e verrà re-indirizzata con un criterio di prossimità.

Attualmente è stato implementato, nel portale della Provincia di Roma (indirizzo internet: [http://elevation.it/ZONACU/servlet/zonacu.servlets.S\\_ElencoComuni?](http://elevation.it/ZONACU/servlet/zonacu.servlets.S_ElencoComuni?)), l'applicativo relativo alla prima fase del progetto, ossia la ricerca base.

### Razionalizzazione grafica delle classificazioni acustiche

Tra le varie difficoltà incontrate per la realizzazione del progetto di informatizzazione, la principale è stata indubbiamente legata alle diverse metodologie tramite le quali i Comuni, o meglio i tecnici incaricati dai Comuni, hanno graficato i piani.

La prima difficoltà è stata quella di riuscire ad ottenere i Piani su supporto informatico; l'altra difficoltà è la varietà dei formati utilizzati (da cartografie colorate a mano a file in supporto CAD, passando per formati tif)

Questa diversificazione e le risorse economiche a disposizione, non consentono, al momento, la realizzazione di un'unica cartografia del territorio provinciale tramite l'insieme delle zonizzazioni dei vari Comuni. Questo è uno dei motivi per cui al momento si è scelto di pubblicare l'applicativo relativo alla prima fase (ricerca base), cioè rendere disponibili i piani acustici dei singoli comuni nel formato in cui sono stati presentati, rinviando la loro integrazione in un'unica cartografia e l'ingegnerizzazione delle mappe per la ricerca dettagliata, in un secondo tempo.

Per tentare di risolvere la difficoltà legata ai diversi formati elettronici dei piani presentati, si è prospettato alla Regione Lazio di presentare una circolare, in cui si consiglia di utilizzare, per la redazione delle cartografie delle classificazioni acustiche, un formato elettronico unico od almeno compatibile con una grafica vettorializzata.

- delle *classi acustiche* per la corrispondenza tra colori e classe acustica.



Figura 3 – Home page per la selezione del Comune

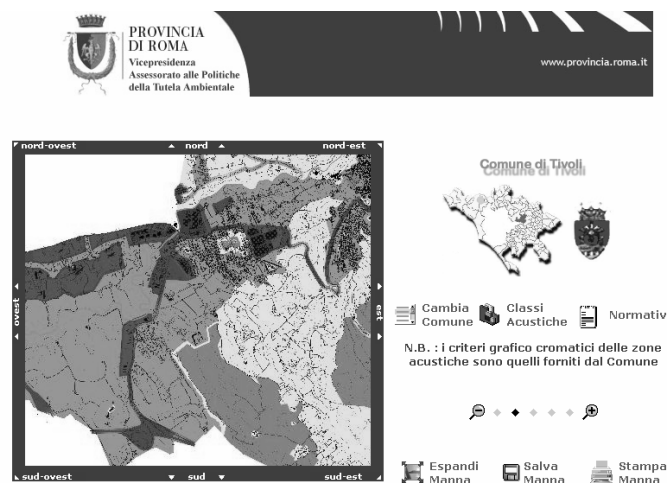


Figura 4 – Esempio di navigazione nella mappa di un Comune

### WEB-APPLICATION

Nel presente paragrafo si espongono alcune immagini tratte dalle pagine web dell'applicativo per la consultazione delle classificazioni acustiche dei Comuni della Provincia di Roma.

Si sottolinea che le classificazioni pubblicate sono quelle relative ai Comuni che hanno fornito la cartografia in formato elettronico, di conseguenza il numero di comuni di cui è possibile consultare le mappe non corrisponde al numero totale dei comuni che hanno redatto la classificazione acustica (alcuni Comuni che hanno approvato la zonizzazione acustica non l'hanno fornita in formato elettronico).

Come si può notare dalle figure 4 e 5, affianco alla classificazione acustica del Comune prescelto, vengono riportate, tra le altre, delle icone per la visualizzazione:

- della *normativa* per l'individuazione dei valori limite previsti per le diverse classi acustiche dal D.P.C.M. 14/11/1997;

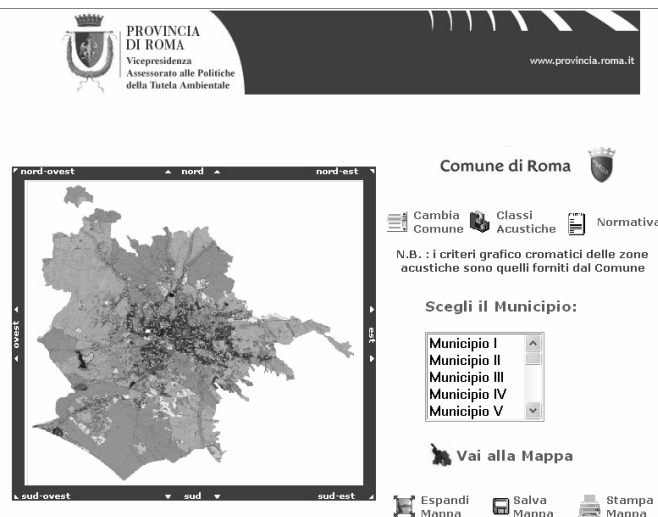


Figura 5 – Esempio di navigazione nella mappa del Comune di Roma

## CONCLUSIONI

Dal lavoro svolto dalla Provincia di Roma in collaborazione con il Dipartimento di Fisica Tecnica, esposto in questa memoria, risulta evidente l'importanza di definire, già in fase di predisposizione delle norme di legge, la necessità di coordinare i piani comunali non solo dal punto di vista grafico e di scala, ma anche informatico.

Sarebbe opportuno che le norme disponessero standard informatici al fine di garantire l'omogeneità delle informazioni in possesso della P.A. ed evitare ulteriori aggravii economici e di tempo.

Inoltre le necessità derivanti dall'applicazione delle norme in materia di pubblicizzazione ed informazione al pubblico dei dati ambientali, ancora molto disattese dalla P.A., necessitano di un migliore coordinamento degli strumenti informatici in dotazione agli enti locali, oltre alla creazione di banche dati condivise e, quindi, omogenee.

## BIBLIOGRAFIA

1. F. Cardia, M. Coppi, P. Prignani, A. Venditti – “La classificazione acustica dei comuni del territorio della Provincia di Roma” – 32° Convegno AIA – Ancona 2005.
2. F. Cardia, P. Prignani, A. Venditti – “Informatizzazione e pubblicizzazione delle classificazioni acustiche dei Comuni della Provincia di Roma” – 33° Convegno AIA – Ischia 2006.
3. Legge 26 Ottobre 1995 – “Legge quadro sull'inquinamento acustico”.
4. Legge della Regione Lazio n° 18 del 3/8/2001 – “Disposizioni in materia di inquinamento acustico per la pianificazione ed il risanamento del territorio”.

## IL MONITORAGGIO ACUSTICO DELLA LINEA FERROVIARIA F.C.U.

Stefano Ortica<sup>1</sup>, Cinzia Tosti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ARPA Umbria, Dipartimento Provinciale di Perugia, s.ortica@arpa.umbria.it

<sup>2</sup>ARPA Umbria, Dipartimento Provinciale di Terni, c.tosti@arpa.umbria.it

### SOMMARIO

Nell'ambito della redazione del piano degli interventi di contenimento ed abbattimento del rumore, generato dalla linea ferroviaria F.C.U. – Ferrovia Centrale Umbria, la Regione Umbria ha dato incarico ad ARPA Umbria di eseguire una serie di misure fonometriche con la finalità di:

- misurare il livello equivalente di rumore da traffico ferroviario in prossimità dei ricettori più vicini alla ferrovia e verificarne il superamento dei limiti;
- caratterizzare le emissioni delle varie tipologie dei convogli;
- analizzare le emissioni relative ai punti singolari dell'infrastruttura ferroviaria quali i ponti in ferro;
- tarare e verificare il modello di simulazione implementato per la redazione delle mappe acustiche.

In questo articolo viene descritta la campagna di misure fonometriche condotta presso ventisette ricettori opportunamente scelti lungo la linea ferroviaria F.C.U., da San Sepolcro, in provincia di Arezzo, fino a Terni.

Nel periodo compreso tra dicembre 2005 e maggio 2006 sono stati infatti eseguiti ventisette monitoraggi in continuo, in altrettanti punti di misura individuati lungo la linea ferroviaria. I punti di misura sono stati scelti o presso ricettori sensibili (asili, scuole, case di cura, case di riposo) o presso abitazioni particolarmente vicine alla linea ferroviaria. Il monitoraggio ha avuto luogo in tutte le tratte della linea ferroviaria F.C.U. ed in particolare:

- linea San Sepolcro – Ponte San Giovanni: sette punti di misura;
- linea Ponte San Giovanni – Perugia S. Anna: sette punti di misura;
- linea Ponte San Giovanni – Terni: sono stati tredici punti di misura.

Nell'articolo viene riportato, per ciascun ricettore, il livello equivalente di rumore misurato, il confronto con il limite stabilito dal DPR 459 del 18/11/1998, il numero di transiti giornalieri ed una analisi dei superamenti dei limiti riscontrati.

Questo studio ha consentito di valutare lo stato attuale di inquinamento acustico prodotto dalla linea ferroviaria F.C.U., nei ricettori a questa più vicina, e definire così lo stato ante operam relativo ad un futuro potenziamento della linea ferroviaria.

### DESCRIZIONE DELLA LINEA FERROVIARIA FCU

La linea ferroviaria FCU si sviluppa lungo l'asse nord-sud dell'Umbria, unendo Terni a Sansepolcro (AR), per una lunghezza complessiva di 147,1 Km. La ferrovia segue per gran parte il percorso della S.G.C. E45. La linea serve i centri urbani di Todi, Marsciano, Perugia, Umbertide e Città di Castello, e attraversa i corsi d'acqua del Tevere, Nestore e Assino. La pendenza massima della linea principale Sansepolcro -Terni è del 20 % e il raggio minimo di curvatura è di circa 300 metri. La lunghezza complessiva delle gallerie presenti sul tracciato è di circa 4,4 Km. La velocità massima attualmente consentita è di 90 Km/h.

La linea si divide nelle tratte di:

- Terni – Perugia Ponte San Giovanni;
- Perugia Ponte San Giovanni – Perugia S. Anna;
- Perugia Ponte San Giovanni – Sansepolcro (AR).

La tratta completa tra Sansepolcro e Terni e quella tra Perugia Ponte San Giovanni e Perugia S. Anna sono interessate da 29 e 73 transiti giornalieri rispettivamente.

La tratta Perugia Ponte San Giovanni – Perugia S. Anna, che si allaccia alla dorsale Terni – Sansepolcro, è caratterizzata da forte pendenza ed ha una lunghezza pari a circa 5,266 Km.

In corrispondenza alle stazioni di Perugia Ponte San Giovanni e Terni avviene l'interscambio con la rete delle Ferrovie dello Stato, rispettivamente con la trasversale Foligno-Terontola (Arezzo) e con la Orte-Falconara (linea adriatica).

La tratta ferroviaria che collega le stazioni di Perugia S. Anna e Perugia Ponte S. Giovanni è a semplice binario, a scartamento ordinario, ed ha pendenze molto elevate. Il dislivello che viene superato è di quasi 220 m su una distanza di 5.266 m. La pendenza massima è del 60 % e viene mantenuta su quasi tutta l'intera tratta per complessivi 2.563 m. Il tracciato è molto tortuoso ed ha raggi minimi da 250 m.

Attualmente la linea è esercita a trazione termica, ma è in progetto la "rielettrificazione", così come per le altre tratte, con la realizzazione di una sottostazione elettrica in prossimità della stazione di Ponte S. Giovanni.

Il materiale rotabile è costituito da automotrici ALn 776 a motore termico alimentato a diesel; i convogli in circolazione sulla FCU sono costituiti da una fino a tre automotrici.

### DESCRIZIONE DEI PUNTI DI MONITORAGGIO ACUSTICO

Sono stati individuati ventisette punti di misura lungo il tracciato della FCU in corrispondenza di particolari ricettori posti nella fascia di pertinenza acustica di tipo A, così come definita dal DPR 459 del 18/11/1998.

Le postazioni fonometriche sono state collocate all'esterno di ricettori sensibili (scuole e case di cura) e abitazioni; la ripartizione dei ventisette ricettori nelle tre categorie (scuole, case di cura, abitazioni) è rappresentata nel grafico di figura 1.

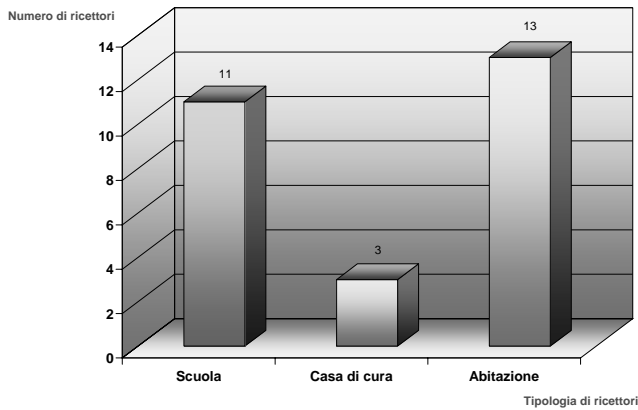


Figura 1: Ripartizione per tipologia dei ricettori monitorati (scuola, casa di cura, abitazione)

Il monitoraggio ha avuto luogo in tutte le tratte della linea ferroviaria F.C.U. ed in particolare:

- linea San Sepolcro – Ponte San Giovanni: sette punti di misura;
- linea Ponte San Giovanni – Perugia S. Anna: sette punti di misura;
- linea Ponte San Giovanni – Terni: tredici punti di misura.

## RISULTATI

I risultati dei rilievi fonometrici sono stati ottenuti secondo la metodologia di calcolo specifica per il rumore ferroviario definita nel DM 16/3/1998.

I rilievi sono stati eseguiti in continuo per una durata di 24 ore. Per ogni rilievo è stato calcolato:

il livello di rumore equivalente da solo traffico ferroviario ( $L_{Aeq}$ );

il livello di rumore equivalente ambientale ( $L_{Amb}$ ), ovvero misurato escludendo dal calcolo gli eventi legati al passaggio dei convogli;

il livello di rumore equivalente complessivo ( $L_{tot}$ ), ovvero la somma dei primi due livelli.

Nelle tabelle 1 e 2 si riportano i risultati dei monitoraggi di rumore condotti nei ventisette ricettori scelti lungo la linea ferroviaria FCU.

Tabella 1: riepilogo dei livelli misurati nel tempo di riferimento notturno

		TEMPO DI RIFERIMENTO NOTTURNO			
Nome ricettore	Tipologia Ricettore	$L_{Aeq}$	$L_{Amb}$	$L_{tot}$	n. transiti
San Sepolcro	Scuola	35,3	40,4	41,6	1
Città di Castello 1	Casa di cura	43,8	45,6	47,8	1
Città di Castello 2	Scuola	29,7	47,9	48	1
Perugia 8	Abitazione	41,9	47	48,2	1

Tabella 2: riepilogo dei livelli misurati nel tempo di riferimento diurno.

		TEMPO DI RIFERIMENTO DIURNO			
Nome ricettore	Tipologia Ricettore	$L_{Aeq}$	$L_{Amb}$	$L_{tot}$	n. transiti
San Sepolcro	Scuola	44,3	55,5	55,8	28
Città di Castello 1	Casa di cura	55,3	53,3	57,7	28
Città di Castello 2	Scuola	45,9	54,8	55,3	28
Umbertide 1	Scuola	54,3	61,6	62,3	29
Umbertide 2	Abitazione	64,8	62,3	66,7	29
Perugia 1	Scuola	49,8	57	57,8	29
Perugia 2	Scuola	53,0	54	56,5	29
Perugia 3	Abitazione	59,3	51,5	60	73
Perugia 6	Abitazione	65,8	53,7	66,1	73
Perugia 9	Scuola	54,4	56,9	58,8	47 <sup>1</sup>
Perugia 8	Abitazione	57,7	52,2	58,8	72
Perugia 7	Abitazione	56,9	59,3	61,3	47 <sup>1</sup>
Perugia 5	Abitazione	64,0	52,3	64,3	51 <sup>2</sup>
Perugia 4	Abitazione	58,5	52,9	59,6	47
Perugia 10	Scuola	48,3	60,8	61	29
Marsciano	Scuola	- - - <sup>3</sup>	52,9	52,9	29
Fratta Todina	Abitazione	63,0	60,5	64,9	29
Todi	Scuola	58,0	57,8	60,9	29
Terni 1	Scuola	45,3	55,4	55,9	29
Terni 2	Abitazione	52,6	52,9	55,8	29
Terni 3	Scuola	43,1	53,3	53,7	29
Terni 4	Abitazione	58,2	53,3	59,1	29
Terni 5	Abitazione	57,5	49,8	58,1	29
Terni 6	Abitazione	54,0	53,6	56,8	29
Terni 7	Abitazione	54,7	54,6	57,6	29
Acquasparta 1	Casa di cura	50,8	60,9	61,3	29
Acquasparta 2	Casa di cura	51,2	51,1	54	29

## ANALISI DEI RISULTATI

Per ciascuna tipologia di ricettore (Scuola, Casa di cura, Abitazione) è riportata, con un grafico ad istogrammi, la distribuzione in classi del livello equivalente di rumore misurato. Negli stessi grafici, dalle barre in rosso, si può desumere il numero di casi in cui è stato riscontrato il superamento del limite diurno. L'analisi dei superamenti del limite notturno non è stata svolta in quanto non è mai stato verificato il superamento in nessuno dei ventisette ricettori.

<sup>1</sup> Con l'orario estivo, nel tratto Perugia Ponte San Giovanni – Perugia S. Anna transitano 47 convogli anziché 73.

<sup>2</sup> Il monitoraggio in questo punto è stato condotto a cavallo dell'ultimo giorno in cui era in vigore l'orario invernale e il primo giorno in cui era in vigore l'orario estivo

<sup>3</sup> Per questo punto non è stato inserito alcun valore del livello di rumore da traffico ferroviario, perché a causa della notevole distanza del ricettore dalla ferrovia (circa 150 metri), la rumorosità relativa era tale da non essere rilevata dalla strumentazione fonometrica.

Nel grafico della figura 2 è rappresentata la distribuzione in classi dei livelli misurati nei ricettori di tipo scolastici.

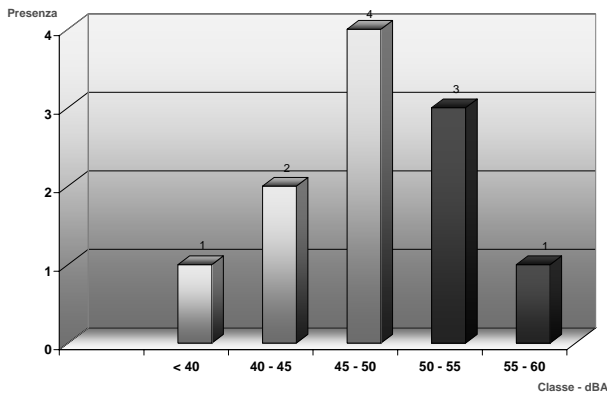


Figura 2: Distribuzione in classi dei livelli equivalenti di rumore da traffico ferroviario misurati negli undici ricettori scolastici

Dal grafico di figura 2 si evince che il superamento del limite diurno (50 dBA) è verificato in quattro degli undici ricettori scolastici monitorati, precisamente nei ricettori *Umbertide 1*, *Perugia 2*, *Perugia 9*, *Todi*.

Nel grafico della figura 3 è riportata la distribuzione in classi dei livelli misurati presso le abitazioni residenziali.

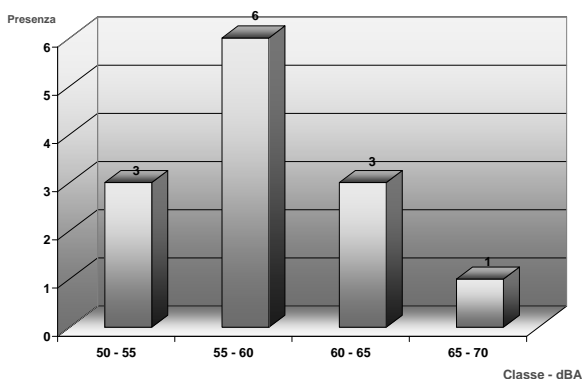


Figura 3: Distribuzione in classi dei livelli equivalenti di rumore da traffico ferroviario misurati nei tredici ricettori abitativi

Dal grafico di figura 3 si evince che il superamento del limite diurno (70 dBA) non è mai verificato in nessuno dei tredici ricettori abitativi.

Nel grafico della figura 4 è riportata la distribuzione in classi dei livelli misurati presso le case di cura.

Dal grafico di figura 4 si evince che il superamento del limite diurno (50 dBA) è verificato presso tutte le tre case di cura prese in considerazione.

I ricettori di tipo scolastico presso i quali è stato misurato il superamento del limite diurno sono:

- Umbertide 1*;
- Perugia 2*;
- Perugia 9*,
- Todi*.

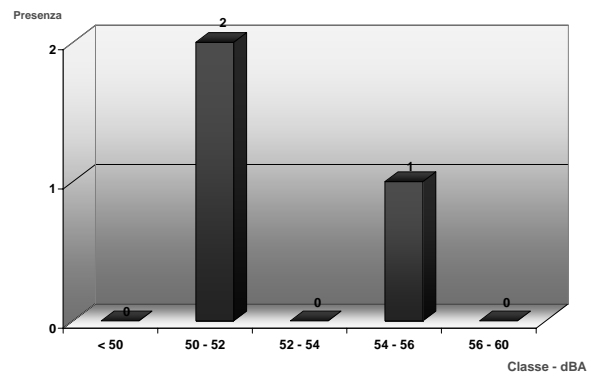


Figura 4: Distribuzione in classi dei livelli equivalenti di rumore da traffico ferroviario misurati presso le tre case di cura

Facendo riferimento ai valori del  $L_{Aeq}$  e del  $L_{amb}$  della tabella 2, si deduce che, nel caso dei ricettori *Umbertide 1* e *Perugia 9*, il livello di rumore da traffico ferroviario è inferiore al livello ambientale. Pertanto un intervento di risanamento acustico su questi due ricettori deve essere necessariamente preceduto da un intervento su quelle sorgenti che determinano il livello ambientale  $L_{amb}$  superiore al livello di rumore da traffico ferroviario  $L_{Aeq}$ . E' evidente che in casi come questi occorre ridurre innanzitutto le emissioni della sorgente primaria che non è costituita appunto dal traffico ferroviario.

Presso i ricettori *Perugia 2* e *Todi* i livelli di rumore da traffico ferroviario sono dello stesso ordine del livello ambientale  $L_{amb}$ , per cui si ritiene necessario sottoporre questi due ricettori ad un piano di risanamento acustico.

E' evidente che detto piano debba essere seguito da altri interventi di mitigazione su quelle sorgenti che determinano il livello  $L_{amb}$  già superiore a 50 dBA.

D'altronde ridurre le emissioni da traffico ferroviario opportunamente sotto il limite di 50 dBA senza intervenire sulle altre sorgenti, che contribuiscono ad un livello  $L_{amb}$  superiore a 50 dBA, non determinerebbe comunque la riduzione del livello globale  $L_{tot}$  al di sotto del limite di 50 dBA.

Le case di cura presso le quali è stato rilevato il superamento del limite diurno corrispondono ai ricettori:

- Acquasparta 1*;
- Acquasparta 2*;
- Città di Castello 1*.

Nel solo ricettore *Città di Castello 1* si ritiene opportuno procedere con un piano di risanamento acustico sulla linea ferroviaria considerando che questa è proprio la sorgente primaria e che contribuisce al livello di rumore totale  $L_{tot}$  57,7 dBA con un  $L_{Aeq}$  di 55,3 dBA.

Negli altri due ricettori *Acquasparta 1* e *Acquasparta 2* non è necessario adottare un piano di risanamento acustico. Infatti in *Acquasparta 1* il superamento del limite diurno (50 dBA) è di soli 0,8 dBA a fronte di un livello ambientale  $L_{amb}$  generato da traffico veicolare pari a 61,6 dBA. Qualsiasi intervento di mitigazione del rumore da traffico ferroviario non comporterebbe alcuna riduzione sul livello totale considerata la marcata differenza tra il livello da rumore ferroviario  $L_{Aeq}$  e il livello ambientale  $L_{amb}$ .

Nel ricettore *Acquasparta 2* la riduzione di soli 1,2 dBA al fine del rispetto del limite di 50 dBA non giustificerebbe il costo necessario per un intervento di mitigazione acustica.

## CONCLUSIONI

In questo articolo sono stati presentati i risultati dei rilievi di rumore da traffico ferroviario condotti su ventisette ricettori individuati lungo tutto il tracciato della linea ferroviaria F.C.U. Ferrovia Centrale Umbra, da San Sepolcro (AR) a Terni.

L'analisi dei risultati ha permesso di individuare in quali e

quanti ricettori si verifica il superamento dei limiti assoluti di immissione fissati dal DPR 459 del 18/11/1998.

La valutazione dell'entità del superamento insieme al confronto tra il livello di rumore da traffico ferroviario e il livello di rumore ambientale, ovvero ottenuto escludendo il contributo dei transiti dei treni, ha permesso di individuare i ricettori presso i quali è necessario e risolutivo intervenire con un piano di risanamento acustico.

## L'AMBIENTE SONORO NEI PARCHI URBANI E LE REAZIONI DEI FRUITORI

Giovanni Brambilla<sup>1</sup>, Luigi Maffei<sup>2</sup>, Giovanni Zambon<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CNR-Istituto di Acustica "O.M. Corbino", Via del Fosso del Cavaliere 100, 00182 Roma

<sup>2</sup> Centro Interdipartimentale per il Controllo dell'Ambiente Costruito Ri.A.S.,  
Facoltà di Architettura, Seconda Università di Napoli, Aversa (CE)

<sup>3</sup> Dipartimento Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università di Milano-Bicocca

### SOMMARIO

La tutela delle aree quiete ha assunto un'importanza crescente, come anche esplicitamente riconosciuto dalla direttiva 2002/49/CE, perché in questi luoghi la popolazione, esposta al sempre più diffuso rumore ambientale, può temporaneamente recuperare il proprio benessere psico-fisico.

Affinchè queste aree possano espletare compiutamente la loro fondamentale funzione di recupero sopra indicata, è indispensabile definire criteri per caratterizzarne l'ambiente sonoro, nella prospettiva anche di relazionarlo con le reazioni dei fruitori delle aree stesse. Queste reazioni, come noto, sono determinate da molteplici fattori, anche non acustici, quali ad esempio l'aspettativa individuale nei confronti sia dell'ambiente nel suo complesso sia dei suoni ivi udibili.

Il lavoro descrive le indagini condotte in alcuni parchi urbani di Milano e Napoli, finalizzate a mettere a punto uno specifico protocollo sperimentale per caratterizzarne l'ambiente sonoro e raccogliere le reazioni dei fruitori dei parchi stessi su differenti aspetti, anche non acustici.

I risultati ottenuti sono interessanti sia perché hanno convalidato il protocollo sperimentale impiegato, sia perché forniscono indicazioni utili sulle reazioni dei fruitori dei parchi urbani anche in relazione all'ambiente sonoro ivi presente.

### 1. INTRODUZIONE

La direttiva europea 2002/49/CE [1] ed il corrispondente decreto legislativo di recepimento nella legislazione italiana [2] hanno tra i loro obiettivi la protezione delle aree quiete all'interno e all'esterno degli agglomerati. Si riconosce, infatti, l'importante funzione svolta da queste aree ove la popolazione può, almeno temporaneamente, recuperare il proprio benessere psico-fisico. Le aree quiete, tuttavia, sono sempre più seriamente minacciate dalla crescente diffusione, sia nello spazio che nel tempo, del rumore ambientale che ne riduce l'estensione e ne degrada l'ambiente sonoro (soundscape). Questo degrado è più accentuato e ricorrente nei parchi urbani delle grandi città a causa del traffico veicolare nelle strade limitrofe al parco, del rumore prodotto dalle attività ricreative nel parco stesso e della presenza di altri eventi sonori come, ad esempio, il sorvolo di aerei.

Premessa indispensabile per la tutela delle aree quiete è una appropriata qualificazione del loro ambiente sonoro che tenga conto non solo delle caratteristiche acustiche, ma anche di altri fattori che concorrono alle reazioni dei fruitori di queste aree, quali l'impatto visivo, le abitudini e la corrispondenza tra le aspettative individuali sull'ambiente, inclusi i suoni ivi udibili, e la percezione di quest'ultimo.

Le numerose ricerche condotte negli ultimi anni sull'ambiente sonoro nei parchi urbani e nelle aree quiete extraurbane hanno mostrato che i parametri acustici più utilizzati, come la ponderazione "A" e gli indici cumulativi (ad esempio il livello continuo equivalente  $L_{Aeq}$  e il livello giorno-sera-notte  $L_{den}$ ), non sono i più appropriati per descrivere l'ambiente sonoro in tali aree [3]. Al riguardo sono state formulate recentemente alcune proposte interessanti di indicatori alternativi, basati sul conteggio di eventi sonori superiori a soglie stabilite mediante livelli percentili [4].

Il presente lavoro descrive l'indagine sperimentale condotta in cinque parchi urbani di Milano, scelti per differenti condizioni funzionali, morfologiche, dimensionali e di ambiente sonoro. Nel corso dell'indagine fonometrica sono state raccolte anche le valutazioni espresse dai fruitori dei parchi su vari aspetti di questi ultimi, non solo acustici. I risultati ottenuti sono stati comparati con quelli di un precedente studio condotto con lo stesso protocollo sperimentale in tre parchi urbani di Napoli [5].

### 2. METODOLOGIA DELL'INDAGINE SPERIMENTALE

L'indagine sperimentale è consistita in rilievi fonometrici eseguiti in alcuni siti ubicati all'interno dei cinque parchi prescelti, come elencato nella Tabella 1, e nella raccolta contemporanea delle valutazioni soggettive su alcuni aspetti del parco espresse dai visitatori presenti in prossimità dei siti prescelti. Mediante la sincronia del monitoraggio acustico con il sondaggio sui visitatori si è cercato di ottenere una buona corrispondenza tra l'esposizione sonora degli intervistati e le loro valutazioni sul parco. I dati sono stati acquisiti nei giorni feriali e il sabato. Sono stati scelti siti ove maggiore era la presenza di visitatori.

In ciascun sito si è proceduto al rilevamento per almeno 30 minuti del rumore ambientale e alla memorizzazione dell'andamento nel tempo del livello continuo equivalente  $L_{Aeq}$  con risoluzione temporale di 1 s e del corrispondente spettro a bande di 1/3 di ottava. Durante il monitoraggio l'operatore rilevava le sorgenti sonore predominanti, nonché quelle responsabili di eventi chiaramente distinguibili nel rumore ambientale. È stata riscontrata la presenza di numerose sorgenti, anche non naturali, quali il rumore veicolare proveniente dalle strade limitrofe al parco ed il sorvolo di aerei. Un esempio al

riguardo è riportato nella Figura 1, ove nell'andamento temporale del livello  $L_{Aeq}$  a 1 s sono indicati i vari eventi sonori e le sorgenti responsabili.

Tabella 1: Parchi urbani di Milano esaminati nell'indagine

Parco	Ubicazione	N. siti rilievo acustico		
		Feriali	Sabato	Totale
Forlanini (Fo)	periferia	2	---	2
Nord (N)	periferia	6	4	10
Sempione (S)	centro	6	4	10
Trenno (T)	periferia	2	---	2
Venezia (V)	centro	6	---	6
Totale		22	8	30

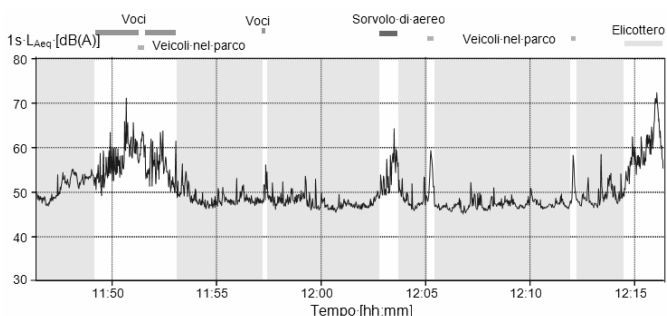


Figura 1: Esempio di monitoraggio acustico (Parco Sempione, giorno feriale)

Il sondaggio è stato condotto con intervista diretta frontale su 232 visitatori dei cinque parchi, distribuiti come riportato in Tabella 2, ove è indicato anche il campione di popolazione intervistato nella precedente indagine svolta in tre parchi urbani di Napoli [5].

Tabella 2: Distribuzione del campione di popolazione nei cinque parchi urbani di Milano e confronto con quello intervistato nei tre parchi urbani di Napoli

Città	Parco	N. soggetti		
		Feriali	Sabato	Totale
Milano	Forlanini (Fo)	16	---	16
	Nord (N)	33	58	91
	Sempione (S)	44	30	74
	Trenno (T)	14	---	14
	Venezia (V)	37	---	37
	Totale	144	88	232
Napoli	Comunale (C)	22	8	30
	Floridiana (Fl)	8	19	27
	Poggio (P)	16	---	16
	Totale	46	27	73

Nell'intervista sono stati raccolti i dati sul soggetto (età, sesso, occupazione), le sue motivazioni e i giorni preferiti per recarsi al parco, nonché il tempo ivi trascorso. Successivamente l'intervistato doveva indicare in che misura alcuni aspetti (vegetazione, aria pulita, pulizia, sicurezza, silenzio) fossero influenti per la gradevolezza di un parco generico. Sullo stato di questi aspetti nel parco esaminato l'intervistato esprimeva il suo giudizio su una scala a cinque categorie comprese tra "molto cattivo" e "molto buono". In merito all'aspetto acustico, per quattro suoni (voci, traffico stradale, sorvolo di aerei e abbaiare di cani) l'intervistato doveva indicare in quale misura il loro ascolto nel parco fosse

previsto e valutarne il disturbo indotto su una scala a cinque categorie comprese tra "niente affatto disturbante" e "molto disturbante". Infine, una scala a cinque categorie comprese tra "per nulla" e "molto" è stata impiegata per i giudizi degli intervistati sul grado di soddisfazione dell'ambiente sonoro del parco e sulla piacevolezza complessiva del parco stesso. Due domande conclusive riguardavano la valutazione della rumorosità della propria abitazione e quella del posto di lavoro, entrambe espresse su scala a cinque categorie comprese tra "per nulla" e "molto".

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

La variabilità dei livelli continui equivalenti  $L_{Aeq}$  rilevati nei cinque parchi milanesi è riportata nella Figura 2, ove è confrontata con quella ottenuta per i tre parchi napoletani.

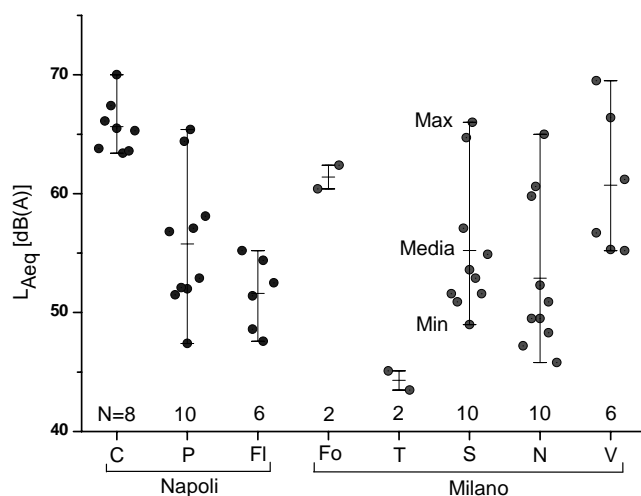


Figura 2: Variabilità dei livelli continui equivalenti  $L_{Aeq}$  ottenuta per i parchi urbani considerati a Milano e Napoli

La maggioranza dei valori medi è compresa tra 52 e 62 dB(A) e la differenza tra i valori massimi e minimi è spesso dell'ordine di 15 dB. I livelli più alti si riscontrano in prossimità dei confini dei parchi, laddove questi sono prospicienti a strade con elevato flusso veicolare. Un esempio dei valori di  $L_{Aeq}$  rilevati è riportato nella Figura 3.

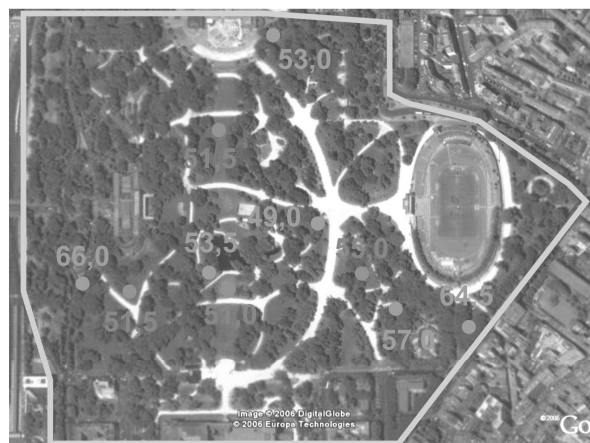


Figura 3: Livelli continui equivalenti  $L_{Aeq}$  rilevati nel parco Sempione (Milano) nei giorni feriali (blu) e il sabato (rosso)

I livelli percentili  $L_{95}$ , invece, presentano una minore variabilità rispetto ai livelli  $L_{Aeq}$ , come evidenziato nella Figura 4, e i valori medi risultano compresi prevalentemente nell'intervallo 45÷55 dB(A).

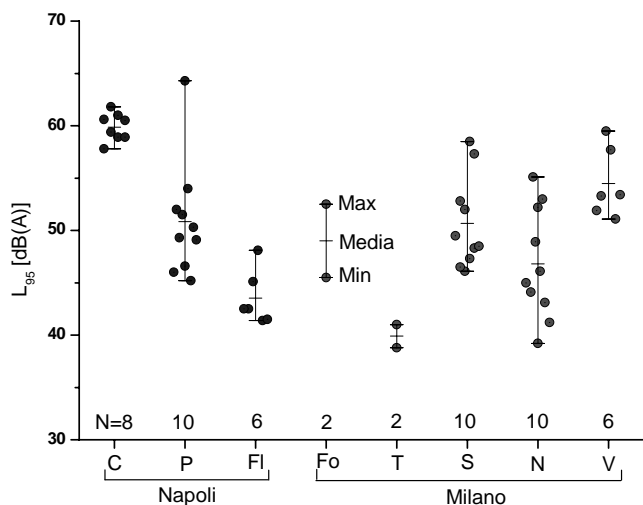


Figura 4: Variabilità dei livelli percentili  $L_{95}$  ottenuta per i parchi urbani considerati a Milano e Napoli

Le risposte fornite alle 13 domande del sondaggio dai 232 intervistati sono analizzabili con diverse chiavi di lettura. Nel seguito sono descritti i principali risultati.

Tutti i parchi esaminati sono frequentati almeno settimanalmente dal 72% degli intervistati per un periodo superiore a 2 ore (53% dei soggetti). Alla luce di questi responsi, analoghi a quelli ottenuti a Napoli e considerato che il 63% degli intervistati dichiara di visitare più frequentemente lo stesso parco, è verosimile che le valutazioni soggettive espresse nell'intervista derivino più da opinioni ed esperienze consolidate piuttosto che da considerazioni estemporanee ed occasionali.

La motivazione più frequente per recarsi al parco è la ricerca di quiete (28% degli intervistati), l'accompagnare i bambini (20% dei soggetti) ed essere in un ambiente naturale (16% dei soggetti), come evidenziato dai dati riportati nella Tabella 3 insieme a quelli ottenuti per i parchi napoletani.

Tabella 3: Motivi più frequenti per recarsi ai parchi urbani di Milano e Napoli

Città	Parco	% intervistati		
		Quiete	Bambini	Natura
Milano	Forlanini (Fo)	12	12	6
	Nord (N)	33	10	25
	Sempione (S)	26	12	12
	Trenno (T)	14	7	7
	Venezia (V)	27	24	8
Napoli	Comunale (C)	27	27	17
	Floridiana (FI)	26	55	0
	Poggio (P)	25	44	12

Gli aspetti ritenuti più importanti per la piacevolezza del parco sono risultati, in ordine decrescente di importanza, la vegetazione (33% degli intervistati), la pulizia (23%) la sicurezza (18%) e la pulizia dell'aria (17%). Il silenzio è stato ritenuto l'aspetto più importante solo dal 9% degli intervistati e il 40% lo ha considerato il meno importante tra i cinque

aspetti proposti. Questo risultato è analogo a quello ottenuto nei tre parchi napoletani e conferma che le caratteristiche non acustiche del parco assumono un ruolo importante nella formazione del giudizio dei fruitori, così come il silenzio non è un requisito essenziale per la piacevolezza del parco mentre lo è il suo ambiente sonoro (soundscape). In altri termini, invece di definire i parchi urbani e quelli extraurbani come "aree quiete" appare più appropriato parlare di "aree di buona qualità sonora" [6].

In merito all'aspettativa individuale di udire alcuni suoni specifici nel parco, le voci e l'abbaiare dei cani (indicati rispettivamente dall'80% e 63% degli intervistati) sono risultati i suoni più attesi, ma anche il rumore da traffico stradale e da sorvoli aerei non è risultato del tutto impreveduto (indicati rispettivamente dal 29% e 34% degli intervistati), verosimilmente per la frequente presenza nel parco degli intervistati che ne conoscono, quindi, le caratteristiche.

Un'ampia percentuale degli intervistati ha dichiarato di non essere affatto (38%) o poco (26%) disturbata dai suoni uditi nel parco, mentre coloro che hanno manifestato di essere molto disturbati hanno indicato come sorgenti responsabili il traffico stradale (43%) e i sorvoli aerei (36%). Questo risultato, analogo a quello ottenuto nei tre parchi napoletani, conferma come anche la tipologia della sorgente (ad esempio se antropica o non antropica) riveste un ruolo importante nel disturbo da rumore indotto sulle persone esposte [7]. Il disturbo, inoltre, è tanto più accentuato quanto più inatteso è il suono udito, ossia la sua presenza è considerata impreveduta dal soggetto in riferimento alle sue aspettative sul contesto ambientale. Questa tendenza è mostrata in Figura 5.

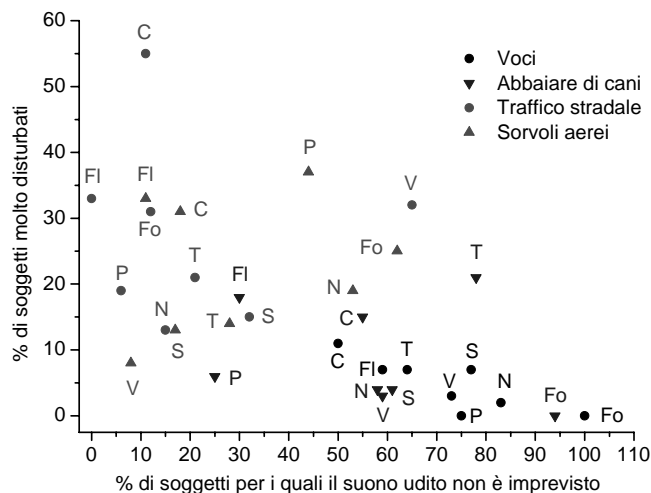


Figura 5: Aspettativa di udire i suoni nel contesto ambientale e disturbo indotto. Le lettere individuano i parchi secondo i codici riportati nella Tabella 3

I valori di  $L_{Aeq}$  rilevati nei 30 siti esaminati nei cinque parchi milanesi sono stati raggruppati in classi con ampiezza di 5 dB e rapportati con le percentuali di soggetti indicanti una buona qualità sia dell'ambiente sonoro che del parco nel suo complesso. I risultati, riportati in Figura 6, mostrano chiaramente come la qualità percepita dell'ambiente sonoro e del parco nel suo complesso diminuiscano al crescere del livello  $L_{Aeq}$ . Per la qualità complessiva del parco, tuttavia, si osserva a parità di livello  $L_{Aeq}$  un giudizio positivo più ampio e meno dipendente da  $L_{Aeq}$ , verosimilmente per l'influenza dei fattori non acustici sulla percezione individuale. La linea

tratteggiata corrispondente all'80% di soggetti indicanti una buona qualità acustica dell'ambiente sonoro è la soglia stabilita dall'agenzia per la protezione ambientale svedese al di sopra della quale un'area è considerata "quieta" [8].

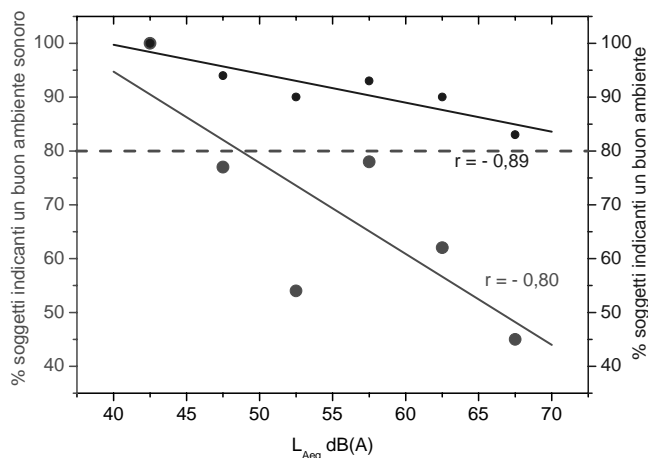


Figura 6: Buona qualità dell'ambiente sonoro e del parco nel suo complesso in funzione del livello  $L_{Aeq}$  nei cinque parchi milanesi

A titolo comparativo nella Tabella 4 si riporta la percentuale di intervistati che hanno indicato una qualità complessiva del parco "buona" o "molto buona" per tutti i parchi milanesi e napoletani esaminati. I valori percentuali sono superiori all'88% per ben cinque degli otto parchi esaminati.

Tabella 4: Percentuale di intervistati indicanti una qualità complessiva "buona" o "molto buona" nei parchi urbani di Milano e Napoli esaminati

Città	Parco	% intervistati
Milano	Forlanini (Fo)	75
	Nord (N)	94
	Sempione (S)	89
	Trenno (T)	100
	Venezia (V)	89
Napoli	Comunale (C)	64
	Floridiana (FI)	63
	Poggio (P)	94

Interessanti sono state anche le risposte degli intervistati sulla rumorosità della loro abitazione e del proprio posto di lavoro, riportate nella Tabella 5. I valori ottenuti sono distribuiti abbastanza omogeneamente tra le cinque categorie di giudizio proposte nell'intervista.

Tabella 5: Percentuale di intervistati indicanti la rumorosità della propria abitazione e del loro posto di lavoro

Ambiente rumoroso	% intervistati	
	Abitazione	Lavoro
Per nulla	17	15
Poco	26	26
Discreto	18	20
Abbastanza	22	24
Molto	17	15

## 4. CONCLUSIONI

L'indagine svolta in alcuni parchi urbani di Milano e Napoli ha permesso di mettere a punto un protocollo sperimentale per l'acquisizione dei dati acustici sull'ambiente sonoro di queste aree e per la raccolta delle valutazioni soggettive dei fruitori su vari aspetti dei parchi stessi.

In generale i parametri acustici correntemente usati non sono appropriati per descrivere l'ambiente sonoro dei parchi in quanto diversi fattori concorrono alla formazione del giudizio soggettivo, tra i quali l'aspettativa individuale di udire il suono, la sua congruità con il contesto ambientale, la tipologia di sorgente sonora (antropica o non antropica).

In generale, a parità di livello  $L_{Aeq}$  l'accettabilità complessiva del parco è più ampia di quella specifica sull'ambiente sonoro in quanto la prima è influenzata anche da fattori non acustici, tra i quali l'aspetto visivo e la sicurezza personale.

## RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano tutte le persone che hanno partecipato ai rilevamenti fonometrici e ai sondaggi. Un particolare ringraziamento a Daria Biacchi, Leda De Gregorio e Marco Vuono per la loro preziosa collaborazione nella raccolta e nell'analisi preliminare dei dati.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. 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.
2. Decreto Legislativo 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, 23/9/2005.
3. G. Brambilla and L. Maffei, Responses to noise in urban parks and in rural quiet areas, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 92(6), pp. 881-886, 2006.
4. D. Botteldooren and B. De Coensel, Quality assessment of quiet areas: a multi-criteria approach, Proc. 6<sup>th</sup> Euronoise Congress, paper 297, 2006.
5. G. Brambilla, L. De Gregorio, P. Lembo e L. Maffei, Una metodologia per la caratterizzazione del paesaggio sonoro nei parchi urbani, Atti 33° Convegno AIA, pp. 99-104, Ischia, maggio 2006.
6. A.L. Brown, Rethinking "Quiet Areas" as "Areas of High Acoustic Quality", Proc. Internoise 2006, paper 55, 2006.
7. B. Schulte-Fortkamp and R. Kull, Are quiet areas good sounding areas?, Proc. 6<sup>th</sup> Euronoise Congress, paper 439, 2006.
8. Ljudkvalitet i Natur- och Kulturmiljöer, Swedish Environmental Protection Agency, Report 5440, Stockholm, 2005.

## CONFRONTO SISTEMATICO FRA LIVELLI ACUSTICI DI LUNGO PERIODO IN DIVERSI CONTESTI ANTROPIZZATI

Alessandro Conte, Michele Balzano

Provincia di Genova – Ufficio Rumore  
L.go Cattanei 3, 16147 Genova  
conte.a@provincia.genova.it, balzano.m@provincia.genova.it

### SOMMARIO

La Provincia di Genova effettua monitoraggi con strumentazione automatica ed in continuo in postazioni fisse (centraline) e mobili (mezzi attrezzati, box agganciabili) da oltre un decennio; ciò ha consentito l'acquisizione di serie di dati di "lungo periodo" (in alcuni casi pluriennali). Lo studio qui riassunto riguarda l'analisi delle misure effettuate in 70 siti distinti, selezionati fra le postazioni di misura relative alle aree maggiormente urbanizzate e/o attraversate dalle più importanti arterie di comunicazione (autostrade e strade principali). In particolare 18 siti sono ubicati in comune di Genova, 33 in diversi comuni costieri e 19 in vari comuni dell'entroterra. Le misure hanno riguardato l'acquisizione dei Leq e dei principali livelli percentili orari. Su questo insieme di dati si è operato un confronto sistematico a diversi livelli di aggregazione temporale, dalla massima sintesi (Leq sui tempi di riferimento per i giorni "tipo" energeticamente medi) a livelli di dettaglio crescenti: evoluzione temporale oraria nei giorni tipo e quindi, per i casi più interessanti, l'analisi dei singoli dati orari effettivamente misurati.

### INTRODUZIONE

La Provincia di Genova effettua monitoraggi con strumentazione automatica ed in continuo dal 1994. Fino al 2000 tale attività di monitoraggio ha riguardato soprattutto strumentazione alloggiata in cabine della rete di rilevamento, finalizzata al controllo dell'inquinamento atmosferico e ubicata nel comune di Genova, consentendo l'acquisizione di serie storiche di dati su basi temporali, in alcuni casi, anche pluriennali. Dal 1996 e soprattutto negli ultimi anni, l'attività di monitoraggio si è concentrata su campagne di durata più limitata (da 24 ore ad alcune settimane o pochi mesi) in siti maggiormente distribuiti nell'intero territorio provinciale.

Su questo insieme di dati si è operato un confronto sistematico a diversi livelli di aggregazione temporale.

In questo senso, il presente studio costituisce una estensione alla analisi temporale di un lavoro a suo tempo svolto [1], in cui l'accento era posto sull'analisi spaziale dei Leq su tempo di misura breve ( $\leq 1$  ora) rilevati in diversi comuni costieri e dell'entroterra. La metodica di campionamento spaziale, utilizzata in modo omogeneo per i comuni considerati, consentì di trattare i dati statisticamente: tale analisi di tipo spaziale (che riguardò 1296 siti distinti relativi a 27 comuni), aveva condotto ad individuare delle caratteristiche statistiche piuttosto marcate riferibili alle due macrocategorie territoriali "costa" ed "entroterra"; nel caso dei comuni costieri la statistica spaziale dei livelli mostrò un andamento quasi simmetrico e con la moda centrata nell'intervallo 60÷65 dBA, mentre nel caso dei comuni dell'entroterra la distribuzione risultò sostanzialmente costante per i valori da 45 a 60 dBA, per poi decrescere decisamente.

Il presente lavoro, che considera realtà territoriali più diversificate rispetto ad allora, è finalizzato a verificare

eventuali analogie o differenze dal punto di vista dell'evoluzione temporale.

### METODOLOGIA E DATI ANALIZZATI

Lo studio ha riguardato l'analisi delle misure effettuate in 70 siti distinti, selezionati fra le postazioni di misura relative alle aree maggiormente urbanizzate e/o attraversate dalle più importanti arterie di comunicazione (autostrade e strade principali). In particolare 18 siti sono ubicati in comune di Genova, 33 in diversi comuni costieri e 19 in vari comuni dell'entroterra.

In Fig. 1 si riportano, in grigio, i comuni della provincia di Genova in cui sono stati effettuati i monitoraggi.

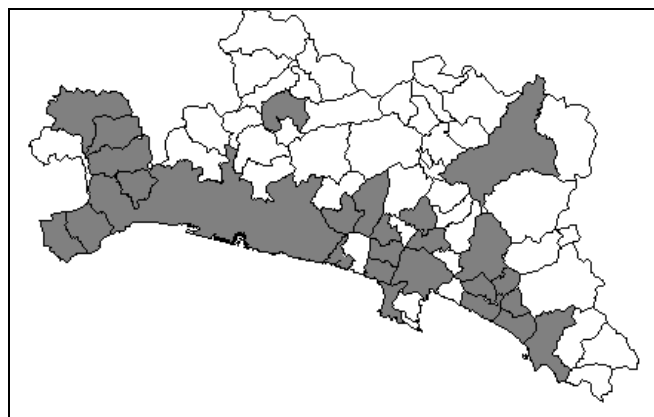


Figura 1. Comuni in provincia di Genova con presenza di siti di misura di lungo periodo.

Le misure, in tutti i casi considerati, hanno riguardato l'acquisizione dei *Leq* e dei principali livelli percentili orari.

Per le successive analisi ed elaborazioni, in presenza di dati acustici pluristagionali sono state definite due "macrostagioni": fredda (da ottobre a giugno) e calda (da luglio a settembre).

Le misure giornaliere sono state sempre effettuate di giorno feriale.

La maggior parte dei dati rilevati, soprattutto per quanto riguarda le misure giornaliere, afferiscono alla stagione fredda.

I dati plurigiornalieri sono stati aggregati in giorni "tipo" feriale, sabato e festivo (tramite media energetica sui livelli delle ore corrispondenti nei diversi giorni dello stesso tipo).

Sono stati confrontati i livelli assunti dal *Leq* nei periodi di riferimento diurno e notturno (*LeqD* e *LeqN*) e da *Lden* (in giorni omogenei). Il confronto è stato effettuato sia nell'insieme complessivo dei dati, sia suddividendo gli stessi per casi analoghi (ad esempio rilievi presso autostrade) o con criterio geografico; allo stesso modo sono stati confrontati i valori assunti dall'escursione differenziale giorno-notte e, nel caso di misure protrattesi sull'arco annuale o comunque su più stagioni, sono state valutate le differenze stagionali nei livelli.

Successivamente, l'analisi è stata estesa all'evoluzione temporale del *Leq* orario (nei giorni tipo in caso di misure plurigiornaliere), allo scopo di verificare, per i casi più emblematici, qualitativamente e quantitativamente l'eventuale similitudine, o disaccordo, anche dal punto di vista evolutivo oltre che da quello energeticamente più globale, individuabile tramite *LeqD* e *LeqN*.

Preliminarmente a quanto seguirà, infine, si ritiene utile riportare le conclusioni di un'ulteriore analisi, a suo tempo svolta, per verificare la variabilità negli anni della rumorosità ambientale per i siti con misure pluriennali: lo studio dell'evoluzione triennale (1994 ÷ 1997) della rumorosità ambientale, misurata in centraline fisse con continuità di dati significativa (7 siti distinti, tutti nell'abitato genovese), fornì un quadro quasi stazionario (in assenza di mutamenti significativi nella circolazione viaria): variazioni dei *Leq* orari nei giorni tipo complessivamente contenute entro circa 1 dBA, con una tendenza generalmente in aumento (6 casi su 7).

## UNO SGUARDO D'INSIEME

In Fig. 2 si riportano le distribuzioni statistiche dei *LeqD* (dBA) per il giorno tipo feriale (e per la stagione fredda), differenziando geograficamente fra Genova, Entroterra e Costa (inoltre non sono stati considerati i rilievi in corrispondenza delle carreggiate autostradali, che si ritiene più corretto analizzare separatamente). In Fig. 3 si riportano le analoghe distribuzioni per *LeqN* (dBA).

I livelli statisticamente più elevati sono riscontrabili nei siti genovesi, i meno elevati nei siti dell'entroterra mentre i siti costieri corrispondono a statistiche in un certo senso intermedie.

In Tab. 1 e Tab. 2 si riportano i valori medi (aritmetici) e le deviazioni standard per *LeqD*, *LeqN* e *Lden* (dBA) per i tre insiemi geografici già considerati e, separatamente, per i siti in corrispondenza di tratti autostradali.

I dati di Tab. 1 sono coerenti con quanto osservato relativamente alle distribuzioni statistiche.

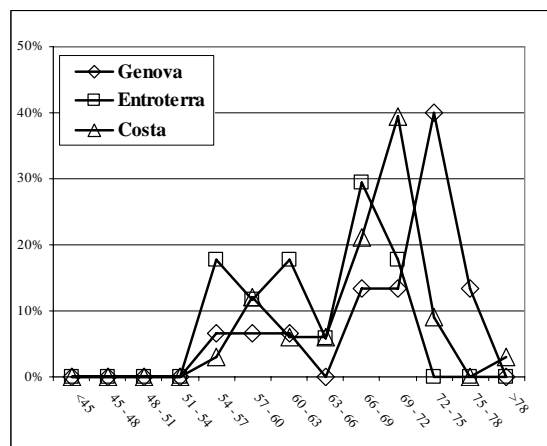


Figura 2. Distribuzioni statistiche dei valori di *LeqD* (giorno tipo feriale) per diverse macrozone.

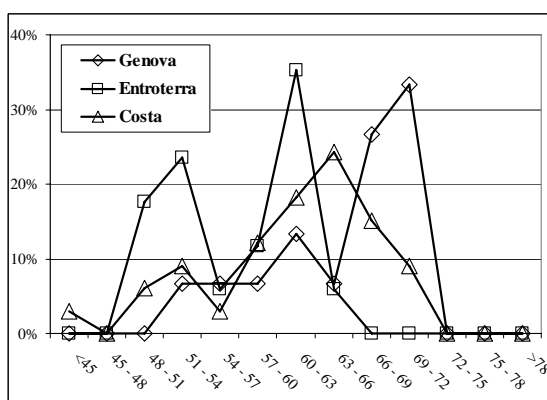


Figura 3. Distribuzioni statistiche dei valori di *LeqN* (giorno tipo feriale) per diverse macrozone.

Più interessanti sono i dati in Tab. 2: i valori tendenzialmente minori corrispondono alle misure presso le autostrade; a Genova si osservano le deviazioni standard maggiori in relazione a *LeqD*, mentre nel caso di *LeqN* le quantità maggiori si verificano sulla costa.

Tabella 1. Medie aritmetiche di *LeqD*, *LeqN* e *Lden* per quattro distinte "macrozone".

Zona	<i>LeqD</i>	<i>LeqN</i>	<i>Lden</i>
Autostrade	72.3	67.5	75.1
Genova	69.7	64.9	72.5
Entroterra	63.6	57.0	65.8
Costa	67.8	61.7	70.0

Tabella 2. Deviazioni standard di *LeqD*, *LeqN* e *Lden* per quattro distinte "macrozone".

Zona	<i>LeqD</i>	<i>LeqN</i>	<i>Lden</i>
Autostrade	5.3	4.6	4.9
Genova	6.3	6.1	6.1
Entroterra	5.4	5.4	5.5
Costa	5.2	6.7	5.8

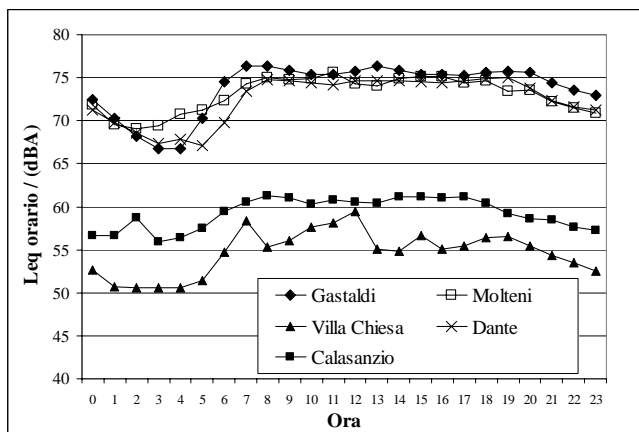


Figura 4. *Leq* orario giorno tipo feriale in alcune postazioni di misura in Genova.

Le differenze, o le similitudini, da sito a sito anche all'interno di una stessa macrozona, diventano più sensibili ed evidenti passando dal *Leq* sul periodo di riferimento all'evoluzione giornaliera del *Leq* orario.

In Fig. 4, come esempio, si riporta l'evoluzione oraria del *Leq* giorno tipo feriale per 5 siti di misura in Genova e dalle caratteristiche spiccatamente differenti: strade ad alto flusso locale e di attraversamento (Dante, Gastaldi, Molteni), strade locali (Villa Chiesa) e zone residenziali esposte a rumore d'area urbano e industriale (Calasanzio).

## LA VARIABILITÀ STAGIONALE

Per 7 siti in Genova e 1 nell'entroterra (Rossiglione) sono disponibili dati plurimensili (per Genova sono stati elaborati i giorni tipo riferendosi all'anno più recente).

Nel caso di Genova, diversificando l'analisi in funzione della tipologia dei siti, si ottiene: in corrispondenza delle principali vie di traffico i livelli sono in genere (salvo una eccezione su 4) superiori nella stagione "fredda" rispetto alla stagione "calda" (da +0.1 a +4.8 dB(A) per *LeqD* e +0.2 ÷ 4.0 dB(A) per *LeqN*); anche nel caso di strade importanti per flusso veicolare ma, comunque, con un carattere maggiormente locale si verificano livelli maggiori nella stagione fredda (di circa 1÷2 dB(A) per *LeqD* e 2÷5 dB(A) per *LeqN*). Questi andamenti sono stati verificati anche per un sito meno direttamente influenzato dal traffico (un parco pubblico esposto al generico rumore urbano).

Nel caso del sito di misura nell'entroterra, ubicato in corrispondenza di una strada provinciale che costituisce anche la via di attraversamento dell'abitato, il confronto ha riguardato mesi primaverili ed estivi ed ha evidenziato variazioni contenute entro circa 1 dB(A), che si differenziano a seconda sia del periodo di riferimento sia del giorno tipo: nel caso feriale la differenza fra primavera ed estate è estremamente contenuta (+0.5 dB(A) per *LeqD* e -0.2 dB(A) per *LeqN*), analogamente per la domenica (+0.2 dB(A) per *LeqD* e -0.6 dB(A) per *LeqN*), mentre nel caso del sabato il differenziale è pari a +1.1 dB(A) per entrambi i periodi di riferimento.

## LA VARIABILITÀ GIORNO - NOTTE

In Tab. 3 si riporta la sintesi statistica dell'analisi sui differenziali *LeqD* - *LeqN* (dB(A)), restringendosi all'esame dei

differenziali relativamente al giorno tipo feriale e nella stagione "fredda" (quando non altrimenti specificato).

In termini di differenziali medi è interessante osservare che questi sono abbastanza simili per i siti costieri e dell'entroterra da una parte e Genova e le autostrade dall'altra; analogamente per quanto riguarda le deviazioni standard: ciò può essere dovuto, almeno in parte, sia alla parziale funzione di "tangenziale" svolta dalla cintura autostradale intorno a Genova, sia alla rilevanza del rumore da traffico urbano (anche di attraversamento) nella maggioranza dei siti monitorati nel capoluogo.

Inoltre, i dati riportati in Tab. 3 evidenziano come la minor variabilità statistica sia riscontrabile fra i dati rilevati in corrispondenza di tracciati autostradali e poi nell'abitato di Genova, mentre la variabilità maggiore è associata ai siti costieri e dell'entroterra.

Per i siti all'interno di Genova, sia nel caso in cui il fenomeno sonoro predominante sia il traffico di attraversamento, sia se il traffico ha carattere più locale, il differenziale è compreso fra circa +4÷5 dB(A); nel caso di siti meno interessati direttamente dal rumore veicolare urbano i relativi differenziali sono compresi in gamma più ampia (+3÷9 dB(A)). Inoltre per il caso, più critico, del traffico urbano di attraversamento si riportano le conclusioni dell'analisi dei differenziali giorno-notte anche dal punto di vista "stagionale": si è verificato che il differenziale è in genere maggiore nella stagione fredda (comunque entro +2 dB(A) rispetto al differenziale nella stagione calda) soprattutto per il caso feriale, mentre tende ad essere superiore nella stagione calda nel caso della domenica (da -0.4 a +3.5 dB(A) rispetto al differenziale per la stagione fredda).

Tabella 3. Differenziali *LeqD*-*LeqN* medi, minimi e massimi e deviazione standard.

	Costa	Entroterra	Genova	Autostrade
media	6.1	6.5	4.8	4.9
dev. st	2.7	2.4	1.3	0.8
min	1.7	2.2	3.0	3.7
max	12.5	11.4	8.6	5.5

## RUMORE DA TRAFFICO: CONFRONTI

### Le autostrade

In Tab. 4 si riportano i valori (dB(A)) per gli indicatori relativi ai periodi di riferimento per il giorno feriale tipo. I siti corrispondono a tre differenti tronchi autostradali: A10 nel tratto urbano genovese (Voltri), A12 nel tratto urbano genovese (Quezzi) ed al di fuori di esso (Chiavari), A26 (Masone).

Interessante è la sostanziale coincidenza fra i livelli rilevati nell'abitato genovese, pur riferendosi a tronconi diversi ed in posizione opposta rispetto ai caselli di uscita per il centro cittadino.

Va rilevato che per la città di Genova la cintura autostradale svolge anche funzioni di "tangenziale", ciò può costituire un motivo a giustificazione dei livelli inferiori riscontrati al di fuori della città, i quali ultimi risultano influenzati soprattutto dal solo traffico di lunga percorrenza e meno da quello locale.

Tabella 4. Livelli per giorno feriale tipo nei siti in corrispondenza di tracciati autostradali.

	Quezzi	Chiavari	Masone	Voltri
<i>LeqD</i>	76.6	66.4	69.2	76.9
<i>LeqN</i>	71.1	62.7	64.4	71.4
<i>Lden</i>	79.0	69.9	72.0	79.2

In Fig. 5 si riportano i grafici dell'evoluzione temporale giornaliera del *Leq* orario per i quattro siti: come si verifica è notevole l'accordo, anche in termini evolutivi oltre che energetici globali, per i due siti all'interno di Genova; i siti corrispondenti a tratti autostradali al di fuori del centro urbano, invece, mostrano differenze quantitative con i primi e fra di loro sia in termini globali (Tab. 4) sia dal punto di vista del ciclo giornaliero dei *Leq* orari (Fig. 5).

Il calcolo del coefficiente di correlazione fra le evoluzioni temporali fornisce una conferma quantitativa a quanto qualitativamente osservato: i dati dei due tratti urbani delle A10 e A12, sebbene corrispondenti a direttrici differenti, sono fortemente correlati (0.97), mentre il tratto urbano della A12 è molto meno correlato con il tratto extraurbano della stessa autostrada (0.77); i dati relativi alla A26 risultano molto correlati (0.96) con quelli della A10 (con cui la A26 è interconnessa), meno con la A12 (0.90 per il tratto urbano e 0.88 per quello extraurbano).

È stata inoltre effettuata una analisi relativamente ad alcuni siti nelle vicinanze di autostrade (Tab. 5, entrambi i siti sono situati nelle vicinanze della A26, entro qualche centinaio di metri, in terreno sostanzialmente aperto e fuori da centri urbani) ed in prossimità della viabilità di accesso a caselli autostradali (Tab. 6, nel caso del sito genovese la prossimità è ad uno dei due caselli di accesso al centro).

I valori (dBA) di Tab. 5 risentono delle distanze relative dal tracciato ed anche da particolarità locali (il sito "Rosselli" è influenzato dalla sorgente stazionaria costituita da un corso fluviale, che ne limita la gamma dinamica giorno - notte). Va comunque osservato che le correlazioni sia fra i dati orari relativi a questi due siti e fra ciascuno di questi e il sito in prossimità della carreggiata della A26 sono elevate (0.95÷0.98).

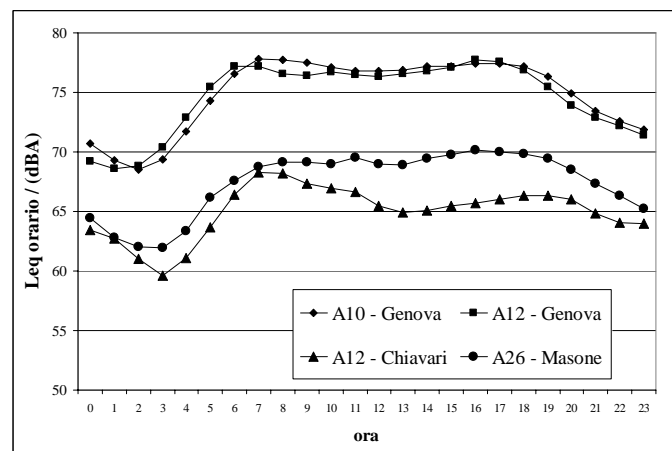


Figura 5. *Leq* orario giorno tipo feriale per vari tratti autostradali.

Tabella 5. Livelli per giorno feriale tipo in siti nelle vicinanze di tracciati autostradali.

	Rosselli	Maddalena
<i>LeqD</i>	54.4	62.3
<i>LeqN</i>	52.2	57.3
<i>Lden</i>	58.8	65.0

Tabella 6. Livelli per giorno feriale tipo in siti prossimi all'accesso a caselli autostradali.

	Arenzano	Genova	Chiavari	Rapallo	Recco
<i>LeqD</i>	69.5	74.8	68.5	69.5	71.5
<i>LeqN</i>	67.5	69.5	59.5	63.0	68.0
<i>Lden</i>	74.4	77.3	69.2	71.3	75.2

I livelli (dBA) riportati in Tab. 6 mostrano come la situazione più critica si verifichi, come ci si può attendere, relativamente al caso genovese; in ogni caso i livelli risultano piuttosto elevati, anche in ragione del fatto che la viabilità prossima all'accesso ai caselli frequentemente coincide con tratti viari afferenti alla rete principale di ciascun comune e, quindi, notevole è il contributo sonoro dato dal traffico locale oltre a quello da e per l'autostrada.

### L'Aurelia

In provincia di Genova l'Aurelia costituisce uno dei principali assi viari sia per la percorrenza fra diversi comuni costieri (in alternativa all'autostrada) sia per la viabilità interna dei comuni attraversati.

In Tab. 7 si riportano i valori statistici (dBA) degli indicatori sui periodi di riferimento per sette siti in corrispondenza dell'Aurelia, in suoi diversi tratti sia all'interno sia all'esterno dell'abitato urbano di Genova.

I livelli risultano elevati, a testimonianza dell'entità non trascurabile dei flussi veicolari presenti, che di frequente comprendono anche una certa percentuale di traffico pesante.

In Fig. 6 si riportano i grafici dell'evoluzione giornaliera (feriale tipo) del *Leq* orario per alcuni siti in prossimità dell'Aurelia e particolarmente rappresentativi di diverse situazioni: tre si riferiscono all'abitato genovese (Via Prà e Via Ronchi e C.so Gastaldi, che a rigori non fa parte dell'Aurelia ma in quella zona ne svolge le effettive funzioni), due in cittadine costiere di ponente (Arenzano e Cogoleto) e due di Levante (Bogliasco e Chiavari, la più consistente, in termini demografici, fra le quattro cittadine rivierasche considerate per il grafico).

Tabella 7. Livelli medi e deviazione standard per il giorno feriale tipo. Siti in corrispondenza della strada Aurelia.

	<i>LeqD</i>	<i>LeqN</i>	<i>Lden</i>
media	70.3	65.8	73.3
dev. st	5.2	5.7	5.5

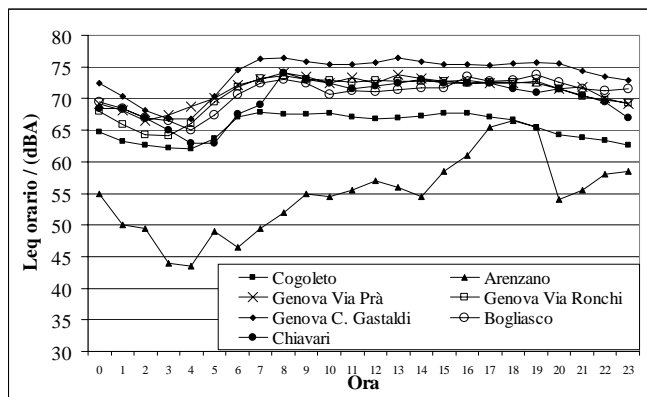


Figura 6. *Leq* orario giorno tipo feriale per vari tratti dell’Aurelia

Un’analisi qualitativa dei grafici mostra come i dati relativi alle due cittadine di ponente siano nettamente a parte rispetto agli altri ed anche fra loro: in effetti in tali due casi il ruolo dell’Aurelia è pressoché limitato a funzioni locali e peculiari.

Il calcolo del coefficiente di correlazione fornisce una conferma quantitativa a quanto osservato: le correlazioni maggiori si verificano fra i dati corrispondenti ai tratti urbani consecutivi in Genova (0.95÷0.97), la correlazione è ancora discreta fra i tratti extragenovesi di levante (0.82), molto meno fra quelli di ponente (0.39).

#### Altre strade principali

In Tab. 8 si riportano i valori statistici (dB(A)) relativi ai livelli monitorati in corrispondenza (8 siti) di alcune fra le principali strade della rete viaria provinciale (in gran parte ex strade statali), avendo scorporato l’Aurelia.

I valori medi di Tab. 8 sono inferiori rispetto a quanto verificato per l’Aurelia, inferiori sono anche le deviazioni standard, indicando una minor disomogeneità, in termini energetici sui periodi di riferimento, tra i diversi siti.

In Fig. 7 si riportano i grafici dell’evoluzione giornaliera (feriale tipo) del *Leq* orario per sei siti in prossimità di altrettante strade: cinque di esse, tutte caratterizzate da consistenti volumi di traffico mostrano andamenti molto simili fra loro e, per caratteristiche generali, con forti analogie con quanto rilevato per l’Aurelia nel tratto genovese ed a Levante. Un solo caso (Val Nure) mostra valori orari nettamente distinti per entità e parzialmente anche per andamento (si tratta, in effetti, di una strada con traffico molto più rado).

Il calcolo del coefficiente di correlazione fornisce i valori più alti (>0.95) per i dati corrispondenti a strade con un certo equilibrio, almeno per i tratti considerati, fra le funzioni locale e di attraversamento (Cento Croci, Fontanabuona, Turchino, Valle Scrivia).

Tabella 8. Livelli medi e deviazione standard per il giorno feriale tipo. Siti in corrispondenza di strade principali a livello provinciale.

	<i>LeqD</i>	<i>LeqN</i>	<i>Lden</i>
media	66.8	61.0	69.0
dev. st	4.6	4.8	4.7

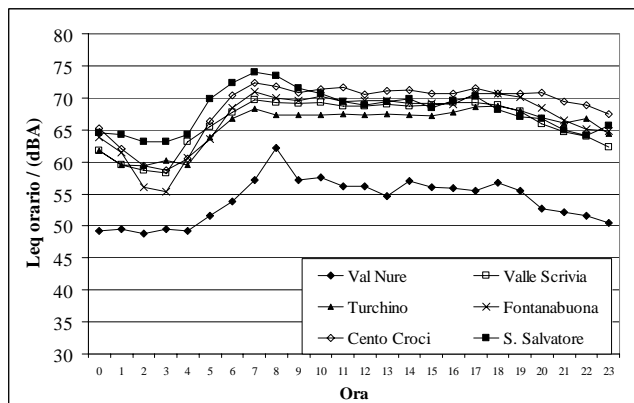


Figura 7. *Leq* orario giorno tipo feriale per alcune strade principali della rete viaria provinciale.

Interessante è la correlazione poco elevata (0.77) fra i dati relativi alla strada S. Salvatore e quella della Fontanabuona, di cui la prima costituisce di fatto la prosecuzione verso la viabilità autostradale (A12); ciò si ritiene presumibilmente dovuto, oltre alle peculiarità del sito di misura relativo alla strada S. Salvatore (zona abitata con attività commerciali e scolastiche), anche al fatto che quest’ultima strada costituisce un collettore di varie viabilità locali.

#### PROSPETTIVE

Per il futuro ci si propone di arricchire il patrimonio di misure con nuovi dati ottenuti da monitoraggi tradizionali corredati da misure di approfondimento quali multispettri, evoluzioni temporali su tempi brevi, etc.

Tutto ciò con le finalità di meglio verificare le situazioni acusticamente critiche e migliorare l’applicazione delle tecniche di campionamento, con l’intento di ottimizzare l’efficacia e l’efficienza delle risorse disponibili.

Già in questa prima fase, comunque, sono state svolte ulteriori elaborazioni propedeutiche agli sviluppi futuri, di cui di seguito si forniscono alcune anticipazioni.

Oltre all’analisi in termini di livelli sui giorni tipo, infatti, per alcuni siti è stata effettuata un’analisi di tipo statistico sull’insieme dei valori orari di *Leq* e *Ln* (dB(A)) effettivamente misurati nell’intero periodo della campagna di monitoraggio. Non si tratta, comunque, di un’analisi esaustiva bensì di una applicazione preliminare volta a verificare le potenzialità del metodo in vista di future applicazioni.

Per trattare insieme confrontabili sono stati selezionati periodi corrispondenti a cicli settimanali e/o feriali o loro multipli; quindi, onde ottenere una rappresentazione compatta e di immediata visualizzazione, su ogni insieme selezionato si sono calcolate media (aritmetica) e deviazione standard.

Inoltre si è costituito un secondo insieme di dati sottraendo ad ogni percentile *Ln* orario il livello *Leq* monitorato nella stessa ora, ottenendo in tal modo una sorta di “normalizzazione” degli *Ln*. Per tali livelli percentili “normalizzati” sono quindi stati calcolati valori medi e deviazione standard. L’insieme dei due gruppi di risultati (dati assoluti e dati normalizzati) consente di confrontare più agevolmente le proprietà “dinamiche” medie del fenomeno misurato in diverse situazioni.

Si osserva, inoltre, che nel caso in cui in un’area ristretta vi sia un’unica sorgente sonora di netta preminenza ed in assenza di ostacoli alla propagazione sonora, la curva interpolata dalle

quantità normalizzate può essere interpretata come “caratteristica” della dinamica statistica (per il tempo di misura selezionato) nell’area in questione.

Dall’analisi preliminare dei dati non normalizzati si sono evidenziati andamenti simili per le deviazioni standard (“assolute”) corrispondenti a misure in prossimità di autostrade, e nettamente differenti in altri casi (si veda la Figura 8 che riporta alcuni esempi relativi a strade e autostrade).

L’analisi preliminare delle medie relative ai dati di  $L_n$  normalizzati ha mostrato interessanti analogie per situazioni simili (Fig. 9), sebbene vi siano comunque differenze da caso a caso che testimoniano le diverse peculiarità.

Si precisa che nelle rappresentazioni di cui alle Figure 8 e 9 le linee grafiche semplicemente uniscono i diversi valori calcolati (di deviazioni standard assolute e di medie degli  $L_n$  normalizzati, rispettivamente) ed hanno l’unico significato di agevolare la lettura del grafico.

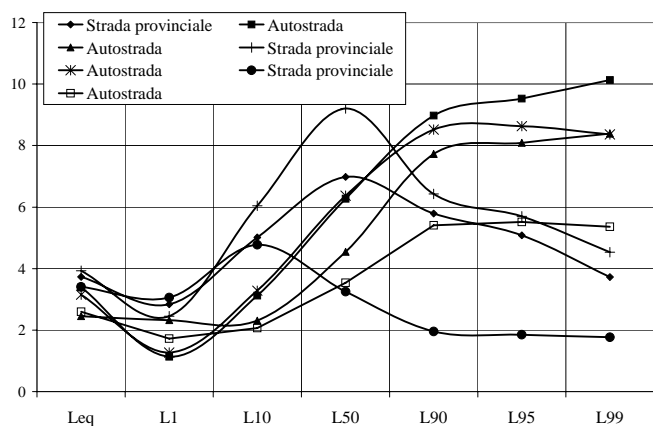


Figura 8. Deviazioni standard “assolute” di  $L_{eq}$  e  $L_n$  per alcuni casi di esempio.

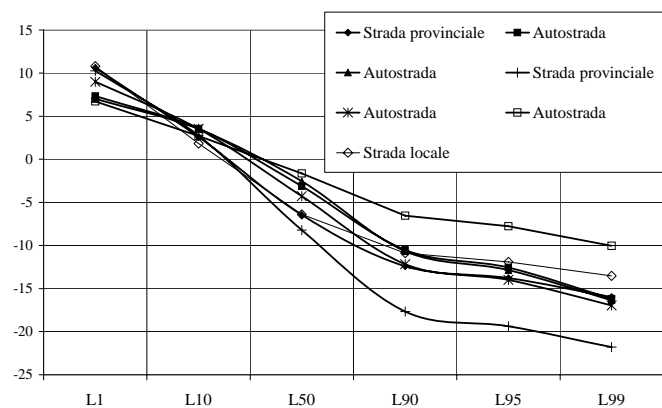


Figura 9. Medie di  $L_n$  “normalizzati” per alcuni casi esempio.

Infine si osserva che per meglio caratterizzare un clima acustico e procedere a confronti approfonditi fra siti distinti, nel contesto dell’analisi temporale, sono molto utili le misure di multispettro [2] (di  $L_{eq}$  e dei principali  $L_n$ ), come illustrato anche dall’esempio in Fig. 10, ove si riporta un sonogramma di  $L_{eq}$  orario (dB) su diversi giorni rilevato in corrispondenza di una importante strada provinciale. Le potenzialità dell’analisi multispettrale sono palesate anche da un esame qualitativo, che consente di evidenziare immediatamente importanti caratteristiche del campo sonoro, ad esempio in questo caso: la sostanziale costanza qualitativa durante il periodo diurno e la grande differenza con la situazione notturna; la concentrazione della rumorosità nelle frequenze basse e medie.

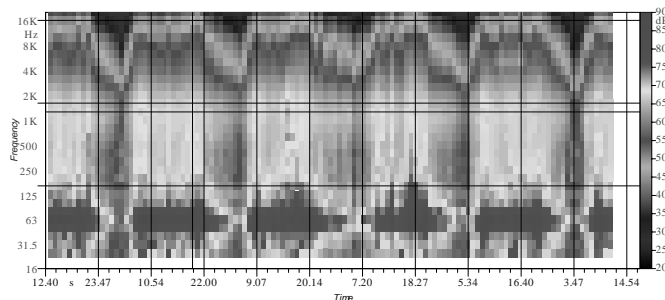


Figura 10. Sonogramma del  $L_{eq}$  orario in corrispondenza di una strada provinciale.

## NOMENCLATURA

$L_{day}$	$L_{eq}$ sul periodo diurno $6 \div 20$ (dBA)
$L_{den}$	livello composto a partire da $L_{day}$ , $L_{evening}$ e $L_{night}$ (dBA)
$L_{eq}$	livello continuo equivalente (dB o dBA)
$L_{eqD}$	$L_{eq}$ nel periodo diurno $6 \div 22$ (dBA)
$L_{eqN}$	$L_{eq}$ nel periodo notturno $22 \div 6$ (dBA)
$L_{evening}$	$L_{eq}$ sul periodo serale $20 \div 22$ (dBA)
$L_n$	livello n-esimo percentile (dB o dBA)
$L_{night}$	$L_{eq}$ sul periodo notturno $22 \div 6$ (dBA)

## BIBLIOGRAFIA

1. F. Stragapede e A. Conte, Mappatura acustica del territorio: l’esperienza della Provincia di Genova, Atti 29° Convegno Nazionale AIA – Associazione Italiana di Acustica, Ferrara, 12-14 giugno 2002, pagg. 95 - 100, 2002.
2. A. Cerniglia, 4-DENA: un nuovo potente mezzo di indagine acustica, *L’Ambiente*, anno IV n. 3, pagg. 28-29, 1997.

## PREZZI MARGINALI IMMOBILIARI DEI DECIBEL DIFFERENZIALI DI INQUINAMENTO DA RUMORE. UN CASO DI STUDIO

Domenico Enrico Massimo <sup>(1)</sup>, Antonia Rita Castagnella <sup>(1)</sup>, Maria Rosaria Giuffrè <sup>(2)</sup>, Michelangela Vescio <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> PAU, Dipartimento Patrimonio Architettonico e Urbanistico;

<sup>(2)</sup> DASTEC, Dipartimento di Arte, Scienza e Tecnica del Costruire  
Università degli Studi *Mediterranea* di Reggio Calabria

D. E. MASSIMO, Dip. PAU, 25 Via Melissari, 89124 Reggio Calabria; Cell 360.997513; Tel 0965.385228; e-mail massimo@unirc.it

### SOMMARIO

Si presenta la seconda parte di una ricerca inter-disciplinare sul rapporto tra qualità architettonico-urbana della città, livelli di benessere fisico-ambientale, lineamenti del relativo mercato immobiliare, scoperta e investigazione su particolari casi di disagio ambientale e di inefficienza urbana. La prima parte [11] della ricerca aveva avviato lo studio urbano su alcuni interessanti isolati dei quartieri Liberty dell'insediamento post-terremoto di Reggio Calabria. L'attenzione è focalizzata su uno dei problemi fisico-ambientali (e, conseguentemente, anche economico-immobiliari) segnalati da residenti intervistati: il rilevante inquinamento da rumore nello spazio dei cortili interni chiusi dovuto alla presenza di unità esterne di condizionatori. La presenza di prezzi immobiliari anomali ha preliminarmente segnalato situazioni di degrado Pareto sub-ottimali, poi ampiamente verificate con indagini dirette e specifici rilevamenti. La verifica sul campo ha confermato situazioni di grave inquinamento acustico. Sia nel primo che nel secondo Caso di Studio le misurazioni fonometriche differenziali ne hanno quantificato la gravità di livelli di rumore a sorgenti accese rispetto alla situazione a sorgenti di rumore spente ( $\Delta = + 7,2$  dB;  $\Delta = + 8,4$  dB). L'analisi immobiliare descrittiva ha constatato la compresenza di inquinamento acustico e deprezzamento immobiliare. Il presente Caso di Studio sperimenta una prima stima del "prezzo marginale dell'inquinamento da rumore" per ogni decibel in più di disturbo sonoro quale variazione negativa di valore immobiliare.

### 1. INTRODUZIONE

La ricerca sperimentale inter-disciplinare concerne il rapporto tra qualità architettonico-urbana della città, livelli di benessere fisico-ambientale, riflessi sul relativo mercato immobiliare, scoperta e investigazione su particolari casi di disagio ambientale e di inefficienza urbana.

La missione è di porre la ricerca al servizio della vivibilità urbana e della qualità insediativa, spesso messa a rischio da interventi e immissioni che compromettono i minimi livelli di vivibilità e di *comfort* fisico-ambientale.

L'obiettivo della ricerca è di avviare la stima dell'impatto negativo dell'inquinamento da rumore sui valori immobiliari ovvero di derivare "prezzi marginali impliciti" dei decibel addizionali di inquinamento acustico.

Il contesto del Caso di Studio presentato è l'insediamento post-terremoto di Reggio Calabria. Particolare attenzione è posta allo studio urbano di alcuni interessanti isolati dei quartieri Liberty della città, tra cui il Quartiere Nord, cosiddetto "Latino" perché vi sono localizzati Dipartimenti e Facoltà dell'Università *Mediterranea* ed è popolato da studenti. Altre istituzioni di alto livello che rafforzano questo peculiare carattere del "quartiere degli studi" sono l'Accademia di Belle Arti e il Conservatorio Musicale.

Si descrivono i primi risultati dei rilievi sperimentali con fonometro che hanno permesso lo studio dell'emissione e della propagazione del rumore. Il gruppo di ricerca è composto da docenti delle discipline di Fisica Tecnica e di Estimo, e i primi hanno effettuato i rilevamenti all'interno di un isolato campione. Le metodiche fisico-tecniche e le strumentazioni scientifiche applicate hanno permesso di: conoscere intensità e propagazione in altezza del rumore; trarre delle prime indicazioni circa la qualità dell'abitare e l'eventuale incidenza differenziale di tale fenomeno sui valori immobiliari degli appartamenti che subiscono direttamente il disturbo.

### 2. IL CASO DI STUDIO. QUALITÀ URBANA E MERCATO IMMOBILIARE

La ricerca sviluppa l'analisi della relazione tra qualità urbano-architettonica dei Quartieri Liberty di Reggio Calabria e valori di mercato riscontrati in effettive compravendite di unità immobiliari.

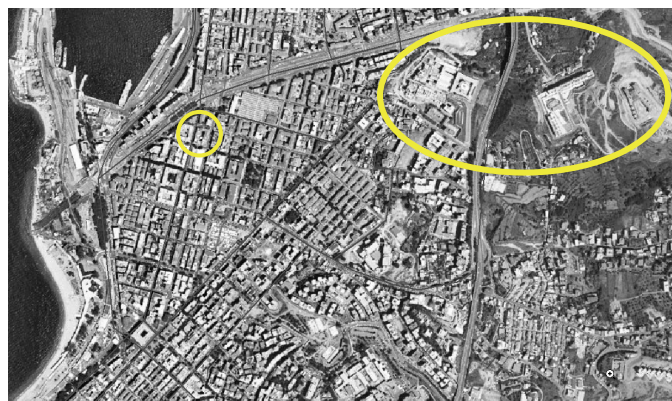


Figura 1. Il Quartiere "Latino" di Reggio Calabria. L'Università degli Studi *Mediterranea* e l'isolato del Caso di Studio

È stato ampliato l'originario studio del mercato immobiliare urbano di Reggio Calabria superando il mezzo migliaio di osservazioni di compravendite realmente avvenute e procedendo alla loro spazializzazione e inserimento in un *Geographic Information System*, GIS [8, 12, 13]. La nuova analisi spazializzata è basata su 727 osservazioni di effettivi prezzi di compravendite immobiliari. Ciò rispetto alle 640, 370 e alle 106 [13] di precedenti fasi di studio. La

spazializzazione in sistemi informativi rende disponibili in continuo e in maniera coordinata l'insieme dei singoli documenti relativi a ciascuna osservazione immobiliare, e ciò anche mediante l'ulteriore costruzione di un modulo di Osservatorio Immobiliare e Urbano e di WebGIS, che permettono un utile *data mining* a distanza (in remoto) e il monitoraggio in remoto.

L'attenzione è focalizzata su uno dei problemi fisico-ambientali ed economico-immobiliari segnalati da residenti e testimoni intervistati con lo svolgimento di indagini demoscopiche preliminari: il rilevante inquinamento da rumore nello spazio dei cortili interni chiusi dovuto alla presenza di unità esterne di condizionatori.

Nel precedente Caso di Studio, la progettualità della Fisica Tecnica aveva prefigurato una soluzione innovativa del problema, aveva quantificato il costo di eliminazione dell'inquinamento da rumore, e aveva auspicato una seconda parte della ricerca indirizzata all'esplorazione dell'impatto negativo dell'inquinamento acustico sui valori di mercato degli immobili colpiti.

Il presente Caso di Studio sperimenta la stima del "prezzo marginale dell'inquinamento da rumore" per ogni decibel in più di disturbo sonoro quale variazione negativa di valore immobiliare.

### 3. OSSERVAZIONE IMMOBILIARE E MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS (MRA)

Nell'area di studio, delimitata secondo una prima articolazione spaziale elaborata con il *Multi Dimensional Scaling* (MDS), sono state introdotte zone immobiliari e aree di qualità omogenea.

I reali (veri e veritieri) prezzi immobiliari, derivati dalla diretta osservazione di 727 effettive compravendite, danno una prima e netta conferma delle delimitazioni di cui sopra sperimentalmente proposte. Di queste compravendite, 447 sono state cognitivamente approfondite mediante sopralluogo diretto e producono la Tabella che segue dei prezzi medi al mq riferiti alla superficie netta.

Tabella 1. Prezzi medi netti al mq osservati, divisi per zone. Differenziali monetari tra zone (statistica descrittiva)

n	Denominaz Zona	L\mq Sup netta	$\Delta[n-(n-1)]$ L\mq	€\mq Sup netta	$\Delta[n-(n-1)]$ €\mq	N. Obs
1	Centro	2.778.395	270.095	1.434,92	139,49	61
2	Nord. Latino	2.508.300	598.155	1.295,43	308,93	71
3	Est.S. Antonio	1.910.145	206.973	986,50	106,90	52
4	Sud. Sbarre	1.703.172	118.502	879,60	61,00	201
5	S. Caterina	1.584.670	243.990	818,40	126,00	16
6	Pellaro	1.340.680	252.652	692,40	130,48	6
7	ArchiVillaSG	1.088.028		561,92		40
	<b>Tot Obs</b>					<b>447</b>

I dati sono stati verificati con modelli di *Multiple Regression Analysis* (MRA) che hanno dato i confortanti risultati di seguito sintetizzati [17, 22].

Tabella 2. Risultati delle MRA (statistica inferenziale)

N	Regr. Num.	Dim. Terr.	Num. Oss.	Adj R <sup>2</sup>	e% SE\m P	Sigt [m\m] 0,05	Sgt [m\m] 0,10	Med. resid %
1	1.1	Rc	727	0,705	17,26	5\7	5\7	-9,26
2	2.1	Centr	447	0,908	13,42	6\7	6\7	-2,56

Quando non è verificata la coerenza tra area di qualità architettonica e valori immobiliari si ha indizio di una

#### **situazione Pareto sub-ottimale,**

dove più probabile è il degrado di caratteristiche qualitative, ambientali e/o architettoniche. E' intuitivo che, proprio in queste situazioni di incoerenza, diventa più importante l'approfondimento della conoscenza e l'investigazione diretta sulle condizioni esistenti. E' necessario passare dall'analisi sistematica a larga scala urbana, alla verifica sul campo di situazioni specifiche e locali. L'analisi a grande scala con modello analitico regressivo ha evidenziato, tra gli altri, due dati particolarmente contraddittori (*outliers*), ovvero due unità immobiliari (appartamenti) compravendute a prezzi che appaiono fortemente differenziati in basso rispetto alle quotazioni percepite nella stessa zona e in prossimità del medesimo isolato. I due prezzi unitari parametrici di compravendita sono pari a:

**€\mq 436,92** (L\mq 846.000) unità al **terzo** livello;

**€\mq 343,96** (L\mq 666.000) unità al **secondo** livello.

I prezzi unitari medi osservati della zona comprendono anche immobili con basso livello di conservazione e manutenzione, ed essendo pari a €\mq 1.295,43 (L\mq 2.508.300), risultano ben superiori a quelli rilevati per i due *outliers* sopra riportati.

### 4. ANALISI DIRETTA DELLE UNITÀ IMMOBILIARI DEL CASO DI STUDIO

I due appartamenti dal prezzo percepito come anomalo sono entrambi ubicati nel Quartiere "Latino", in un isolato Liberty, che possiede eccellenti caratteristiche posizionali, accuratamente progettato in più parti dal noto ingegnere reggino Flaminio Giuseppe De Mojà [15].

Un primo sopralluogo all'interno dell'isolato denuncia il degrado dei due spazi interni comuni: un corte e una "chiostrina", originariamente contigui.

Si constata una ulteriore situazione non desumibile al di fuori di una verifica diretta: la presenza di un forte inquinamento da rumore nella "chiostrina", prodotto da due grandi unità esterne di condizionatore (Figg. 2 e 3) che disturbano fortemente sia il primo appartamento (Primo Piano) e sia il secondo appartamento (Secondo Piano). Questi diventano oggetto del Caso di Studio.

### 5. RILIEVI ACUSTICI SPERIMENTALI DI FISICA TECNICA.

E' stato ampliato il primo originario rilevamento geometrico dell'Isolato, già avviato con il Primo Modulo della ricerca [11], integrando le misurazioni di una prima corte di isolato (circa in media metri 16x11) con quelle del secondo e più ristretto spazio interno comune di fabbricato che si configura più come una "chiostrina" (circa in media metri 9x4) che come vero e proprio cortile. Anche in questo caso, nel sopralluogo diretto sono state localizzate e rilevate geometricamente più fonti di inquinamento acustico.

#### 5.1. Scopo dei rilievi acustici

La valutazione dell'inquinamento da rumore è stata effettuata attraverso una serie rilievi fonometrici che integrano quelli geometrici di posizionamento e rappresentazione delle due sorgenti [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Per la prima fase (fisico-tecnica) della ricerca, i rilievi fonometrici sono finalizzati alla determinazione della rumorosità dovuta alle sorgenti fisse disturbanti riscontrate, posizionate su una parete della “chiostrina”, e rappresentate dalle due unità esterne di impianti di condizionamento.



Fig. 2. Due sorgenti disturbanti

Fig. 3. Due sorgenti disturbanti

Nella seconda fase (estimativa) della ricerca, la valutazione tende a verificare l'esistenza ed, eventualmente, stimare comparativamente l'incidenza (negativa) del rumore (ovvero dell'inquinamento acustico) sul valore commerciale dei due immobili analizzati.

Gli appartamenti esaminati sono posti rispettivamente alle quote (+1,60; +5,10) ml e (+3,40; +6,90) ml rispetto alle due parallele strade pubbliche delimitanti l'isolato urbano.

Sono state effettuate le seguenti misure.

Tabella 3. Elenco delle misure

R	Localizzazione	Sorgente S	dB
R2	Secondo Piano vano a contatto	spenta	47,2
R3	Primo Piano vano a contatto	accesa	57,9
R4	Secondo Piano vano a contatto	accesa	55,6
R5	Primo Piano vano contiguo	accesa	53,6
R6	Secondo Piano vano contiguo	accesa	51,2

In particolare i rilevamenti sono stati effettuati negli ambienti direttamente confinanti con la “chiostrina” in prossimità delle rispettive finestre tra loro in asse (Figura 4) dei due punti (R2; R3) dove.

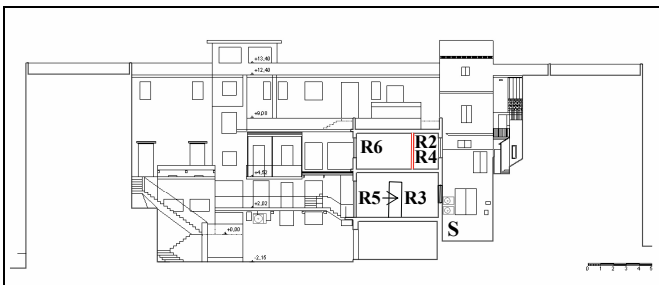


Figura 4. Individuazione di sorgenti sonore S e di punti di misura R

### 5.2. Parametri misurati

In base alla normativa vigente, il parametro misurato è stato il Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A,  $L_{Aeq}$ , valore del livello di pressione sonora ponderata "A" di

un rumore costante che, nel corso di un periodo specificato T, ha la medesima pressione quadratica media di un suono considerato, il cui livello varia in funzione del tempo:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (1)$$

dove:

- T è il periodo di misura;
- $t_1$  e  $t_2$  sono gli istanti iniziale e finale del periodo di misura;
- $p_A(t)$  è il valore istantaneo della pressione sonora ponderata A del segnale acustico, in Pascal (Pa);
- $p_0 = 20 \mu Pa$  è la pressione sonora di riferimento.

### 5.3. Normativa di riferimento

La normativa a cui si è fatto riferimento, per le misure e per la valutazione dei limiti di emissione della sorgente considerata, è la seguente:

- L. 26.11.1995, n. 447, *Legge Quadro sull'inquinamento acustico*;
- D.P.C.M. 14.11.1997, *Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore*;
- D.M. 16.03.1998, *Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico*.

## 6. RISULTATI DELLE MISURE. RELAZIONE FONOMETRICA

Sono stati effettuati rilievi a finestre aperte, con la sorgente di rumore accesa: R3 (**57,9 dB**) al Primo Piano (secondo livello fuori terra); R4 (**55,6 dB**) al Secondo Piano (terzo livello fuori terra). È stato effettuato un rilievo R2 (**47,2 dB**) al Secondo Piano (terzo livello fuori terra), a sorgenti spente e a finestre aperte. Sono stati effettuati due rilievi nei vani contigui a quelli direttamente a contatto con la “chiostrina”, rispettivamente al Primo Piano (R5; **53,6 dB**) e al Secondo Piano (R6; **51,2 dB**).

In Figura 5 è riportato il diagramma relativo alla misura del  $L_{Aeq}$ , per il punto R3 (**57,9 dB**), al Primo Piano, a sorgenti accese e a finestra aperta.

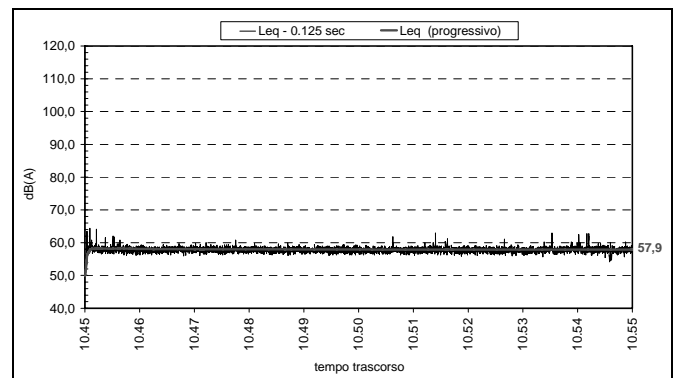


Figura 5. Livello equivalente misurato nel punto R3. Primo Piano, sorgenti accese e finestra aperta

In Figura 6 è riportato il diagramma relativo alla misura del  $L_{Aeq}$ , per il punto R4 (**55,6 dB**), al Secondo Piano, a sorgenti accese e a finestra aperta.

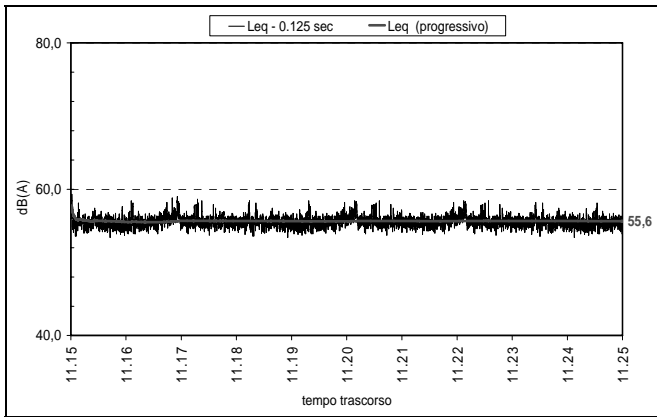


Figura 6. Livello equivalente misurato nel punto **R4**. Secondo Piano, sorgenti accese e finestra aperta

In Figura 7 è riportato il diagramma relativo alla misura del  $L_{Aeq}$ , per il punto R2 (**47,2 dB**), al Secondo Piano, a sorgenti spente e a finestra aperta.

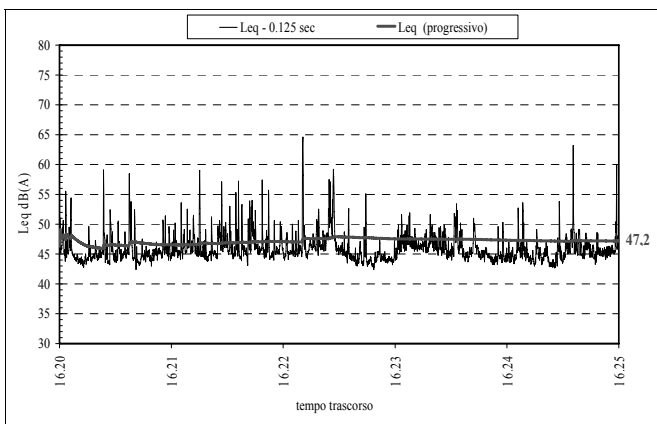


Figura 7. Livello equivalente misurato nel punto **R2**. Secondo Piano, sorgenti spente e finestra aperta

In Figura 8 è riportato il diagramma relativo alla misura del  $L_{Aeq}$ , per il punto R5 (**53,6 dB**), al Primo Piano, a sorgente accesa e a finestra aperta, in vano contiguo.

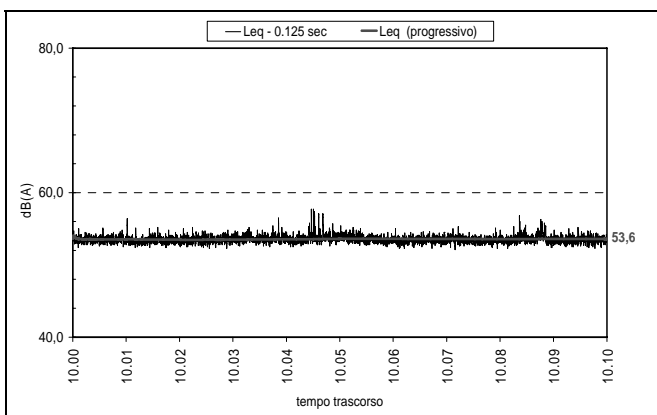


Figura 8. Livello equivalente misurato in vano contiguo, nel punto **R5**. Primo Piano, sorgenti accese e finestra aperta

In Figura 9 è riportato il diagramma relativo alla misura del  $L_{Aeq}$ , per il punto R6 (**51,2 dB**), al Secondo Piano, a sorgenti accese e a finestra aperta, in vano contiguo.

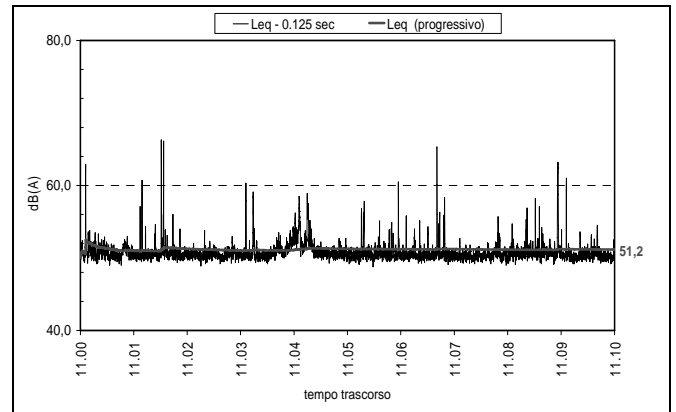


Figura 9. Livello equivalente misurato in vano contiguo, nel punto **R6**. Secondo Piano, sorgenti accese e finestra aperta

I risultati comparativi sono sintetizzati criticamente nelle Tabelle che seguono.

Dalla comparazione dei livelli di rumore misurati con i rilievi R4 ed R2 è possibile verificare che, al Secondo Piano, esiste una significativa e grave differenza  $\Delta$  tra i valori della rumorosità a sorgenti accese e a sorgenti spente pari a ben 8,4 dB.

Tabella 4. Sintesi dei risultati delle misurazione R3 ed R2

**$L_{Aeq}$  misurato (dB)**

	Sorgente accesa R4. Piano 2	Sorgente spenta R2. Piano 2	Differenza
Punto	55,6 dB	47,2 dB	$\Delta = 8,4$ dB

Dalla comparazione dei livelli di rumore al Primo e al Secondo Piano, rispettivamente misurati con i rilievi R3 e R4, con sorgenti accese e finestre aperte del vano a diretto contatto, è possibile verificare, limitatamente al caso specifico, un differenziale tra piani pari a 2,3 dB.

Tabella 5. Sintesi dei risultati delle misurazione R3 ed R4

**$L_{Aeq}$  misurato (dB)**

	Sorgente accesa R3. Piano 1	Sorgente accesa R4. Piano2	Differenza
Punto R	57,9 dB	55,6 dB	$\Delta = 2,3$ dB

Per aumentare l'informazione circa il differenziale di inquinamento acustico tra piani, è stata effettuata la comparazione dei livelli di rumore al Primo e al Secondo Piano in ambienti contigui a quelli a diretto contatto con la "chiostrina". Essi sono stati rispettivamente misurati con i rilievi R5 ed R6, con sorgenti accese e finestre aperte, in vani contigui a quelli a diretto contatto.

Viene confermato, limitatamente al caso specifico, un differenziale tra i piani analogo al precedente pari a 2,4 dB.

Tabella 6. Sintesi dei risultati delle misurazione R5 ed R6

**$L_{Aeq}$  misurato (dB)**

	Sorgente accesa R5. Piano 1	Sorgente accesa R6. Piano 2	Differenza
Punto R	53,6 dB	51,2 dB	$\Delta = 2,4$ dB

## 7. STIMA DI PREZZI MARGINALI IMMOBILIARI DEI DECIBEL DIFFERENZIALI DI INQUINAMENTO DA RUMORE. UN CASO DI STUDIO

### 7.1. La caratteristica “inquinamento” nel mercato immobiliare

I risultati dei rilevamenti fonometrici documentano un diverso impatto che la fonte disturbante sembra spiegare rispettivamente nei due appartamenti del Caso di Studio.

La tappa successiva della ricerca è quindi di stimare e derivare il cosiddetto “prezzo marginale dell’inquinamento” ovvero il “prezzo marginale implicito di ciascun decibel differenziale di inquinamento da rumore”.

Nella stima di un appartamento, la caratteristica “inquinamento” segnala la presenza di un’alterazione del contesto ambientale dove si colloca l’appartamento rilevato o da valutare [16, 17, 18, 20, 21]. L’inquinamento può essere presente in varie forme (acustico, atmosferico, elettromagnetico), in più componenti e in diversi livelli di concentrazione e intensità. La misura dell’inquinamento può essere talvolta espressa in termini cardinali mediante misure fisico-tecniche dettagliate, ripetibili, verificabili, professionali. Tenendo presente la realtà spesso opaca del mercato immobiliare e correlandola con la presenza subdola (e spesso tanto discontinua quanto ricorrente) di inquinamento, i compratori devono percepire intuitivamente, senza l’aiuto di misure complesse e professionali, l’alterazione e il peggioramento del contesto ambientale in cui è collocato l’appartamento oggetto di compravendita. Il compratore reale, dotato di conoscenze a-tecniche e limitate, arriva al massimo a percepire la presenza dell’alterazione ambientale peggiorativa e, in casi di particolare gravità, ad addebitare un ulteriore *plus* negativo. In caso contrario, può constatare l’integrità delle amenità ambientali che circondano l’appartamento stesso. In entrambi i casi, tale intuitiva percezione sulla caratteristica “inquinamento” può ripercuotersi sulla disponibilità a pagare del potenziale compratore. Nell’atto del concreto acquisto, ciò si può trasformare in una variazione del prezzo totale dell’appartamento, con il segno più o meno e proporzionale alla gravità dell’inquinamento medesimo.

### 7.2. Prezzo marginale implicito dell’inquinamento

Il prezzo marginale dell’inquinamento acustico si valuta considerando e comparando due o più appartamenti dello stesso segmento di mercato, aventi quindi pari caratteristiche localizzativo-posizionali e tecniche, ma differenti situazioni relative a livelli di quiete differenziali.

Nella fattispecie del rumore, il prezzo marginale unitario dell’inquinamento dovrebbe esprimere la variazione di valore degli appartamenti per ogni decibel in più di differenza **della rumorosità dovuta alle sorgenti fisse riscontrate**. Nello specifico Caso di Studio della ricerca, la differenza è riscontrata confrontando due serie di corrispondenti misurazioni con rilievi fonometrici, in due appartamenti sovrapposti, quindi ubicati nello stesso isolato urbano, fabbricato e corpo di fabbrica, con caratteristiche tecniche pienamente comparabili, quindi appartenenti al medesimo segmento del mercato immobiliare.

La stima del differenziale di prezzo degli appartamenti (prezzo marginale dell’inquinamento) riguarda il danno patrimoniale inteso come perdita di valore dell’appartamento al Primo Piano rispetto a quello del Secondo Piano in presenza della causa agente, in questo caso acustica.

Dai dati acquisiti con i due rilevamenti geometrico e fisico-tecnico si può costruire la tabella dei dati che segue.

Tabella 7. Caratteristiche immobiliari dei due appartamenti A e B

Caratteristiche	um	App A	App B	$\Delta (A-B)$
Prezzo totale	Mil	50	50	0
Anno comprav.	Anno	1995	1995	0
Superficie	mq	75	59	+16
Livello piano	n	2	3	-1
Conservazione	1-4	1	1	0
Ascensore	0-1	0	0	0
Inquinamento 1	dB	57,9	55,6	+2,3
Inquinamento 2	dB	53,6	51,2	+2,4

### 7.3. Differenza di prezzo di mercato

La differenza di prezzo di compravendita tra gli appartamenti A e B è nulla. Entrambi, come risulta da dati sensibili e documenti dell’osservazione immobiliare, sono stati compravenduti nel 1995, in un insoddisfacente stato di conservazione e manutenzione (1=pessimo, nella scala 1-4).

La differenza di inquinamento acustico tra i due appartamenti è pari a 2,3 dB a sfavore del Primo Piano, che appare più pesantemente colpito dal rumore in entrambe le coppie di rilevamenti fonometrici coordinati. A questa differenza corrisponde la somma delle differenze tra le caratteristiche immobiliari moltiplicate per i rispettivi prezzi marginali. Questi sono derivati sia dai dati del caso specifico, sia dalle medie del mercato locale tipico. Alcune di queste, come l’incidenza media del piano in più o in meno, sono desunte come segue dall’osservazione specifica e dal generale *Data Base* sistematico di cui sopra, derivato da una pluriennale attività di ricerca di Estimo Immobiliare.

Il prezzo marginale della superficie è assunto pari a €/mq 436,92 (L/mq 846.000). Il prezzo marginale del diverso livello di piano è generalmente complesso perché dipende anche ed è correlato dalla presenza/assenza dell’ascensore. È generalmente quantificato in €/mq 51,64 (L/mq 100.000), e in questo caso può essere euristicoamente assunto pari a complessive € 2.582,28 (L 5.000.000) per appartamento.

### 7.4. Derivazione del prezzo marginale

Se il prezzo marginale del diverso livello di piano è di € 2.582,28 (L 5.000.000) in meno per ogni piano a salire, ciò è in accordo con il fatto che nel fabbricato e nel corpo di fabbrica non è presente l’ascensore e che risulta penalizzata l’accessibilità all’appartamento B posto al Secondo Piano.

In questo caso si avrà il prezzo marginale stimato nel modo che segue per ciascun decibel differenziale di maggior rumore generato dalla causa agente.

$$O_A = (75 - 59) \cdot 846.000 + (2 - 3) \cdot (-5.000.000) + (53,2 - 51,2) \cdot (-p_{INQ}) - (75 - 59) \cdot 846.000 - 5.000.000 = -2,4 \cdot p_{INQ}$$

$$p_{INQ} = 18.536.000 \div 2,4 = 7.723.333 \text{ L} \Delta \text{dB} = 3.988,76 \text{ €} \Delta \text{dB}$$

Se il prezzo marginale del diverso livello di piano è di € 2.582,28 (L 5.000.000) in più per ogni piano a salire, ciò è in accordo con la luminosità e l’affrancamento da introspezione nella “chiostrina”. Entrambe le condizioni crescono proporzionalmente all’aumentare del piano. Viceversa, tale andamento risulta in contrasto con il fatto che non c’è l’ascensore e che ne risulta maggiormente penalizzata

l'accessibilità dell'appartamento B al Secondo Piano. In questo caso si ha un prezzo marginale (negativo) più basso per ciascun decibel differenziale di maggior rumore, stimato nel modo che segue.

$$0_B = (75 - 59) \cdot 846.000 + (2 - 3) \cdot 5.000.000 + (53,2 - 51,2) \cdot (-p_{INQ}) - (75 - 59) \cdot 846.000 + 5.000.000 = 2,4 \cdot p_{INQ}$$

$$p_{INQ} = 8.535.000 \div 2,4 = 3.556.250 \text{ L} \Delta \text{dB} = 1.836,65 \text{ €} \Delta \text{dB}$$

Limitatamente allo specifico Caso di Studio, ciascun decibel marginale di inquinamento acustico addizionale influenza negativamente e sensibilmente, nel senso di "change in property price per decibel" [9, 14], il valore immobiliare dei due appartamenti analizzati.

## 8. PRIME CONCLUSIONI E PROSPETTIVE DI RICERCA FUTURA

La ricerca, presentata quale parte di una più ampia attività inter-disciplinare, ha rilevato quanto segue.

La presenza di prezzi immobiliari anomali ha segnalato situazioni di degrado Pareto sub-ottimali. Una preliminare analisi immobiliare descrittiva ha permesso di rilevare la compresenza di deprezzamento immobiliare e di inquinamento acustico. La verifica sul campo in un isolato urbano con fenomeni rilevati di deprezzamento ha fatto scoprire ulteriori situazioni di grave inquinamento acustico negli spazi comuni interni all'isolato come un cortile e una "chiostrina" contigui.

Le misurazioni fonometriche hanno riguardato due appartamenti sovrapposti e hanno quantificato l'oggettiva gravità dell'inquinamento e dell'alterazione della quiete interna all'isolato. Con la comparazione dei livelli di rumore misurati con i rilievi è stato verificato che esiste al Secondo Piano una significativa e grave differenza tra i valori della rumorosità a sorgenti accese ( $R_4=55,6\text{dB}$ ) e a sorgenti spente ( $R_2=47,2\text{dB}$ ); in particolare tale marcata differenza  $\Delta$  è pari a 8,4 dB. Dalla comparazione dei livelli di rumore al Primo e al Secondo Piano, rispettivamente misurati con i rilievi  $R_3$  e  $R_4$ , con sorgenti accese e finestre aperte del vano a diretto contatto con la causa agente, è possibile verificare, limitatamente al caso specifico, un differenziale tra piani pari a 2,3 dB. È stata effettuata anche una seconda comparazione dei livelli di rumore al Primo ( $R_5$ ) e al Secondo ( $R_6$ ) Piano, misurati in ambienti contigui a quelli a diretto contatto con la "chiostrina" e con la causa agente. È stato confermato un differenziale di inquinamento tra i due appartamenti analogo al precedente e pari a 2,4 dB.

Data la dinamica che vede maggiormente inquinati i piani inferiori, è stata effettuata una prima stima sperimentale del prezzo marginale implicito di ciascun decibel differenziale di inquinamento da rumore, tenuto conto del diverso impatto che la fonte disturbante sembra esplicare in immobili posti a diverso e progressivo livello di piano.

Il prezzo marginale implicito di ciascun decibel differenziale di inquinamento può essere influenzato dall'incidenza che a sua volta ha, più in generale, il livello di piano nella formazione del prezzo di mercato immobiliare.

Il piccolo caso esposto ha la finalità di avviare la sistematica costruzione di una campionatura di ulteriori dati per verificare la significatività di quanto stimato in precedenza nel caso singolo. Ciò sulla base della prova statistica delle ipotesi sul futuro campione osservato e non sull'odierno dato supposto significativo.

La ricerca dovrà quindi proseguire con un ampliamento dei dati al fine di rendere maggiormente verificata la significatività della stima.

La raccolta di un campione adeguato di dati specifici potrebbe facilitare l'introduzione delle caratteristiche ambientali (come l'inquinamento acustico) nell'osservazione immobiliare mediante l'adozione della corrispondente variabile nei più complessi modelli di analisi regressiva.

## 9. BIBLIOGRAFIA

### 9.1 Fisica Tecnica

1. Bernasconi C. (2001) *L'acustica nella progettazione architettonica*. Il Sole 24 Ore, Milano.
2. Bufera F.M. (1995) *Architettura e ambiente*. Etaslibri, Milano.
3. Cirillo E. (1997) *Acustica applicata*. McGraw Hill, Milano.
4. Cosa M. (1992) *L'inquinamento da rumore*. La Nuova Italia Scientifica, Roma.
5. Moncada Lo Giudice G. (1997) *Acustica*. Masson, Milano.
6. Raffellini G. (ed.) (1994) *Manuale di progettazione edilizia*. Volume 2. Criteri ambientali e impianti. Hoepli, Milano.
7. Rocco L. (1984) *Fondamenti di acustica ambientale*. Alinea, Firenze.

### 9.2 Estimo

8. Adams Business Media (1998) *GIS in Real Estate*. GIS World, Chicago.
9. Hawkins R. (1999) *Review of Studies on External Costs of Noise*. DOT, London, Uk, Mimeo.
10. IVSC (2003) *International Valuation Standard*. ISCV, London.
11. Massimo D. E., Alberti E. A., Giuffrè M. R., Vescio M. (2006) Deprezzamento immobiliare in presenza di inquinamento acustico in ambiente urbano. In: Asdrubali F. (ed.) *Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana*. 6° Congresso Nazionale Ciriaf. Morlacchi Editore, Perugia.
12. Massimo D. E. (2005) Qualità dei dati e prospettive di spazializzazione nello studio dei mercati immobiliari. In: Stellin G. (ed.) *La ricerca scientifica in campo estimativo*. Atti del I Incontro della Società Italiana di Estimo e Valutazione. Venezia, 16.11.2005. Dei, Roma.
13. Massimo D. E., Castagnella A. (2006) Sperimentazione di parsimonius models per l'analisi dei mercati immobiliari. Un caso di Studio a Reggio Calabria. In: Oppio A., Tartaglia A. (ed.) *Governo del territorio e strategia di valorizzazione dei beni culturali*. CLUP Editrice, Politecnico di Milano, Milano.
14. Navrud S. (2002) *The State-Of-The-Art on Economic Valuation of Noise*. Agricultural University of Norway, Mimeo.
15. Neri D. (2001) *Le architetture della ricostruzione a Reggio Calabria dopo il terremoto del 1908*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Conservazione, Dipartimento PAU, Università degli Studi *Mediterranea* di Reggio Calabria. Non pubblicata.
16. Simonotti M. (1989) *Fondamenti di metodologia estimativa*. Liguori Editore, Napoli.
17. Simonotti M. (1997) *La stima immobiliare*. Utet, Torino.
18. Simonotti M. (2005a) *Manuale delle stime immobiliari*. Geoval, Roma.
19. Simonotti M. (2005b) *Prontuario delle stime immobiliari*. Geoval, Roma.
20. Simonotti M. (2006) *Metodi di stima immobiliare. Applicazione degli standard internazionali*. Dario Flaccovio Editore, Palermo.
21. Tecnoborsa. (2005) *Italian Property Valuation Standard*. Tecnoborsa S.c.p.a., Roma.
22. Triplett Jack E. (1986) The Economic Interpretation of Hedonic Methods. *Survey of Current Business*. January, 36-40.

## UNA METODOLOGIA PER LA MISURA DELLE PRESTAZIONI ACUSTICHE DI PAVIMENTI SOPRAELEVATI

Francesco Asdrubali, Francesco D'Alessandro

CIRIAF, Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti, 67, 06125 Perugia

### SOMMARIO

La normativa UNI EN ISO 140-12:2001 fornisce una metodologia di misura atta a valutare le prestazioni acustiche di pavimenti sopraelevati in termini di abbattimento del rumore aereo e di calpestio tra due ambienti confinanti. I pavimenti sopraelevati sono spesso utilizzati negli allestimenti di uffici e centri direzionali poiché consentono di creare al di sotto del piano di calpestio un vano tecnico all'interno del quale far passare le cablature delle diversi reti, risultando di grande utilità dal punto di vista funzionale (facilità di ispezione, riparazione e modifiche degli impianti), estetico ed acustico.

In questa memoria vengono riportate le procedure di misura utilizzate presso il Laboratorio di Acustica della Facoltà di Ingegneria di Perugia per l'esecuzione delle prove definite dalla normativa UNI EN ISO 140-12. Tale norma prevede la misura di due parametri,  $L_{n,f}$  e  $D_{n,f}$ , rispettivamente definiti come il livello di pressione sonora di calpestio e l'isolamento acustico alla trasmissione laterale, e il calcolo dei corrispondenti indici unici  $L_{n,f,w}$  e  $D_{n,f,w}$ . Tali grandezze permettono di qualificare le prestazioni acustiche del pavimento, supponendo che la parete divisoria tra i due ambienti di misura sia dotata di un potere fonoisolante superiore a quello del pavimento stesso.

Particolare risalto è dato all'allestimento delle camere di prova e al montaggio dei campioni, essendo queste le fasi più complesse e che maggiormente influenzano i risultati finali.

### 1. INTRODUZIONE

Un pavimento sopraelevato è un sistema di pavimentazione composto da pannelli poggianti senza fissaggio su una struttura di sostegno di una certa altezza rispetto all'estradosso del solaio, in modo da ottenere sotto la superficie di calpestio un'intercapedine per alloggiare servizi ed impianti. Questa soluzione è molto utilizzata all'interno di uffici e centri direzionali a causa della sua notevole funzionalità. Al di sopra dei pannelli, inoltre, possono essere previste diverse tipologie di finiture superficiali (moquette, parquet, linoleum, gres porcellanato, etc..).

Presso il Laboratorio di Acustica della Facoltà di Ingegneria di Perugia è stata messa a punto una metodologia di misura delle prestazioni acustiche di pavimenti sopraelevati basata sulle procedure contenute all'interno della normativa UNI EN ISO 140-12 [1].

La suddetta normativa prevede la misura di due parametri,  $L_{n,f}$  e  $D_{n,f}$ , rispettivamente definiti come il livello di pressione sonora di calpestio e l'isolamento acustico alla trasmissione laterale, e il calcolo dei corrispondenti indici unici  $L_{n,f,w}$  e  $D_{n,f,w}$  per mezzo delle procedure definite nelle normative UNI EN ISO 717-1 e 2 [2, 3].

Tali grandezze permettono di qualificare le prestazioni acustiche del pavimento, sia nei confronti dei rumori aerei che dei rumori impattivi, e più nello specifico descrivono l'efficacia del pavimento stesso nell'ostacolare la propagazione del suono tra due ambienti dotati del medesimo pavimento sopraelevato e separate da un divisorio avente un potere fonoisolante superiore a quello del pavimento stesso.

Nella pratica comune, infatti, i divisori tra ambienti confinanti vengono installati direttamente al di sopra dei pavimenti sopraelevati, creando così una via di propagazione del suono all'interno dell'intercapedine posta sotto il piano di

calpestio tra il pavimento e l'estradosso del solaio che mette direttamente in comunicazione gli ambienti stessi. Per questa ragione l'utilizzo di materiali e strutture non adeguate o la non corretta progettazione possono creare condizioni di discomfort acustico.

### 2. METODOLOGIA DI MISURA

La norma europea UNI EN ISO 140-12 fornisce un metodo di laboratorio per la misura dell'isolamento acustico per via aerea e dell'isolamento acustico dal rumore di calpestio di un pavimento sopraelevato, avente un'intercapedine d'aria di altezza definita, montato al di sotto di una parete divisoria che separa due ambienti chiusi. In questo modo è possibile simulare il comportamento di due tipici uffici o stanze adiacenti, aventi in comune un pavimento sopraelevato, con la sottostante intercapedine d'aria e una parete divisoria (fig. 1).

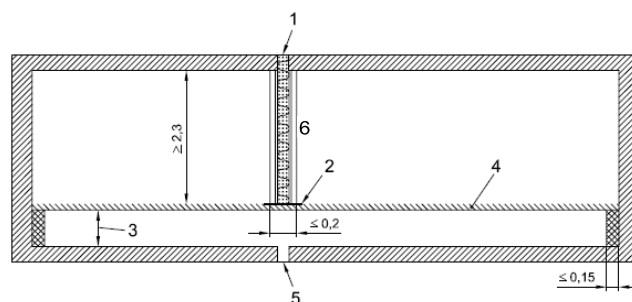


Figura 1: Requisiti della camera di prova [1]: 1) separazione elastica; 2) materiale flessibile; 3) altezza pavimento; 4) pavimento; 5) separazione elastica; 6) parete divisoria.

Le grandezze che si misurano sono l'isolamento acustico per via aerea e l'isolamento dal rumore di calpestio tra le due camere di prova del laboratorio, a condizione che la trasmissione del suono per vie diverse dal pavimento sopraelevato e dalla comune intercapedine d'aria sia trascurabile. Tali grandezze sono definite come isolamento acustico alla trasmissione laterale normalizzato  $D_{n,f}$  e livello di pressione sonora di calpestio per trasmissione laterale normalizzato  $L_{n,f}$ .

L'isolamento acustico alla trasmissione laterale normalizzato  $D_{n,f}$  (in bande di un terzo di ottava) è definito come la differenza tra le medie spazio-temporali dei livelli di pressione sonora prodotti in due camere da una sorgente sonora collocata in una delle due, risultante dalla trasmissione laterale determinata dall'elemento sottoposto a prova, normalizzata rispetto ad un valore di riferimento dell'area di assorbimento acustico nella camera ricevente:

$$D_{n,f} = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

dove:

- $L_1$  è la pressione sonora media nella camera emittente;
- $L_2$  è la pressione sonora media nella camera ricevente;
- $A$  è l'area di assorbimento equivalente della camera ricevente;
- $A_0$  è l'area di assorbimento di riferimento (in laboratorio  $A_0 = 10 \text{ m}^2$ ).

Il livello di pressione sonora di calpestio per trasmissione laterale normalizzato  $L_{n,f}$  (in bande di un terzo di ottava) è definito come il valore medio del livello della pressione sonora nella camera ricevente prodotta da un generatore di calpestio normalizzato posto in differenti posizioni sul pavimento della camera emittente, attraverso la struttura sottoposta a prova, normalizzato rispetto ad un valore di riferimento dell'area di assorbimento acustico nella camera ricevente:

$$L_{n,f} = L_f - 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

dove:

- $L_f$  è la pressione sonora media nella camera ricevente prodotta dal generatore di calpestio normalizzato;

L'area di assorbimento acustico equivalente  $A$  della camera ricevente si calcola dal tempo di riverberazione misurato secondo la UNI EN ISO 354 [4] utilizzando la formula di Sabine:

$$A = \frac{0.16 V}{T} \quad (\text{m}^2) \quad (3)$$

dove:

- $V$  è il volume della camera ricevente;
- $T$  è il tempo di riverberazione misurato in camera ricevente.

I valori degli indici unici di valutazione  $L_{n,f,w}$  e  $D_{n,f,w}$  vengono calcolati per mezzo delle procedure definite nelle normative UNI EN ISO 717-1 e 2; tali procedure sono del tutto equivalenti a quelle utilizzate più comunemente per il calcolo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante  $R_w$  e dell'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L_{n,w}$ .

### 3. ALLESTIMENTO DELLA CAMERA DI PROVA E DESCRIZIONE DEI CAMPIONI

#### Descrizione delle camere riverberanti utilizzate per l'esecuzione delle misure

Una camera si dice "riverberante" quando all'interno di essa si ottiene con buona approssimazione un campo sonoro diffuso. Perché ciò si realizzi è opportuno che le pareti abbiano coefficiente di rinvio dell'onda sonora il più possibile vicino all'unità per tutto il campo delle frequenze udibili e siano progettate in modo tale che la loro forma renda minima l'esaltazione selettiva dei modi propri dell'ambiente. Il Laboratorio di Acustica dell'Università di Perugia dispone di camere riverberanti adiacenti (fig. 2) provviste di un'apertura di prova che le rende comunicanti e nella quale viene montato il campione sottoposto all'indagine durante le misure di fonoisolamento.

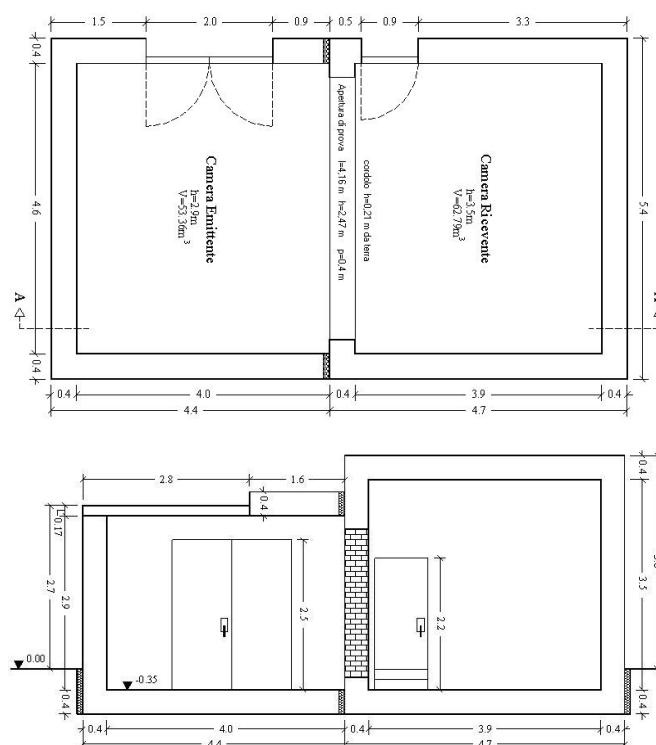


Figura 2: Pianta (sopra) e sezione longitudinale (sotto) delle camere riverberanti accoppiate utilizzate per l'esecuzione delle misure.

Tali camere accoppiate hanno la forma di due parallelepipedi strutturalmente isolati l'uno dall'altro tramite l'interposizione di uno strato di polistirolo di 10 cm; il complesso dei componenti poggia su un pavimento galleggiante posto in opera al di sopra delle travi rovesce di fondazione, con interposto materiale elastico (neoprene) per lo smorzamento di eventuali vibrazioni trasmesse dalla struttura portante dell'edificio, realizzando in tal modo un filtro meccanico passa-basso.

Le pareti laterali e le basi delle camere, intonacate con calce, sono realizzate in cemento armato di spessore pari a 0,4 m; tale dimensione garantisce un potere fonoisolante superiore a 70 dB ( $R_w$ ). L'accesso alle camere è garantito da due aperture praticate sulle pareti laterali, con porte costituite da uno scatolato metallico di 6 cm di spessore, realizzato in

lamiera; mediante il riempimento delle ante di sabbia con tripla battuta ed attraverso l'applicazione di guarnizioni siliconiche in gomma si consente di raggiungere un potere fonoisolante maggiore di 50 dB.

Le dimensioni geometriche e le caratteristiche delle camere riverberanti soddisfano in pieno quelle richieste dalla UNI EN ISO 140-12. Le caratteristiche geometriche dei vari componenti sono riportate in figura 2.

### Descrizione dei campioni di pavimento sopraelevato sottoposti a prova

Il campione sottoposto a prova è costituito da pannelli di spessore pari a 36 mm che sono stati installati su tutta la superficie delle camere riverberanti con l'estradosso del pavimento ad una quota di 25 cm. In particolare si sono utilizzati:

- Pannello pavimento tipo S-Floor CA 36, prodotto dalla Edil Beton Perugia S.p.A. con le seguenti caratteristiche:
  - Composizione: miscela di calcestruzzo alleggerito rinforzato con rete metallica e fibre minerali;
  - Dimensioni: 600x600x36 mm;
  - Massa superficiale: 63,9 Kg/m<sup>2</sup> (massa unitaria pannello 23 Kg);
  - Finitura: faccia superiore liscia e presenza di un basso rilievo agli angoli per il fissaggio della piastrina.
- Piedini: i piedini sono costituiti da una base in acciaio con una barra filettata  $\Phi 14$  compreso un dado bloccante, una testa in acciaio zincato con una guarnizione in PVC. Una piastrina superiore in acciaio zincato (dim. 75x75 mm) con una vite per il bloccaggio dei pannelli.

In figura 3 viene riportata un'immagine relativa al montaggio del campione di prova.



Figura 3: Fasi del montaggio del campione sottoposto a prova.

Al fine di valutare il miglioramento delle prestazioni acustiche, soprattutto nei riguardi dei rumori impattivi, derivante dall'installazione di una finitura superficiale al di sopra dei pannelli costituenti il campione, è stata condotta una campagna di misura successivamente alla stesura di una moquette avente le seguenti caratteristiche:

- Tipo: TECSOM
- Produttore: TARKETT SOMMER
- Dimensioni pannello: 500x500x6 mm

- Massa superficiale: 4,5 Kg/m<sup>2</sup>

Tale moquette è stata unicamente appoggiata al di sopra dei pannelli, senza utilizzare collanti.

In figura 4 viene riportata un'immagine raffigurante il campione con la suddetta configurazione.



Figura 4: Vista del campione di prova con finitura superficiale.

### Allestimento della camera di prova e montaggio del campione

Il montaggio dei campioni di prova e l'allestimento delle camere di prova sono stati effettuati conformemente a quanto stabilito dalla UNI EN ISO 140-12

Il campione di prova è stato messo in opera nel seguente modo: i piedini sono fissati al suolo su assi da 600x600 mm e i pannelli sono in seguito posati sugli stessi regolandone la orizzontalità e l'altezza agendo sul piedino stesso al fine di ottenere un'altezza rispetto al pavimento delle camere riverberanti di 25 cm; in seguito i pannelli sono fissati tra loro tramite una piastrina d'angolo avvitata sul pedino.

Tra il pavimento e le pareti laterali è stato inserito un cordone di materiale antivibrante di spessore pari a 10 mm.

Una parete laterale e entrambe le pareti di fondo dell'intercapedine d'aria sono state rivestite di un materiale fonoassorbente costituito da pannelli di lana di roccia di spessore 8 cm e densità 70 Kg/m<sup>3</sup> conformemente a quanto previsto dalla UNI EN ISO 140-12 (figura 5).

La parete divisoria (figura 6) posta sopra il pavimento sopraelevato che divide l'ambiente di prova in due camere distinte deve possedere elevate proprietà di isolamento sonoro e avere uno spessore totale inferiore ai 200 mm. A questo fine si è deciso di utilizzare una parete avente la seguente stratigrafia:

- doppia lastra in cartongesso da 12,5 mm;
- struttura metallica da 55 mm avente funzione di sostegno per il pannello isolante realizzato in lana di roccia da 50 mm densità 50 Kg/m<sup>3</sup>;
- lastra in cartongesso intermedia da 12,5 mm in

- corrispondenza dell'intercapedine d'aria;
- struttura metallica da 55 mm avente funzione di sostegno per il pannello isolante realizzato in lana di roccia da 50 mm densità 50 Kg/m<sup>3</sup>;
- doppia lastra in cartongesso da 12,5 mm.



Figura 5: Particolare del materiale fonoassorbente installato lungo le pareti dell'intercapedine.



Figura 6: Vista della parete divisoria posta tra i due ambienti di prova.

Tra il pavimento sopraelevato e la parete separatrice è posto un cordone antivibrante di spessore pari a 10 mm.

La messa in opera della finitura superficiale è stata eseguita semplicemente appoggiando i pannelli di moquette sul pavimento sopraelevato, senza l'ausilio di collanti.

Al fine di raggiungere i valori del tempo di riverberazione all'interno della camera ricevente richiesti dalla normativa sono stati utilizzati degli appositi pannelli fonoassorbenti installati a parete in fibra di poliestere.

L'utilizzo di pannelli diffusori sospesi al soffitto di entrambe le camere di prova, invece, permette di raggiungere condizioni ottimali di campo sonoro diffuso all'interno delle stesse [5].

#### Catena di misura

Per l'esecuzione delle prove è stata utilizzata la seguente strumentazione di misura:

- Sorgente: dodecaedrica omnidirezionale; su ogni faccia è installato un altoparlante modello GHX 165 Audio Design (utilizzata nelle misure di isolamento acustico alla trasmissione laterale normalizzato  $D_{n,f}$ );
- Generatore di rumore da calpestio normalizzato. La macchina ha dimensioni 0,30 m x 0,80 m con h = 28 cm, è dotata di 5 martelli in acciaio temprato ed appoggia su tre supporti muniti di ammortizzatori vibrazionali (utilizzata nelle misure di livello di pressione sonora di calpestio per trasmissione laterale normalizzato  $L_{n,f}$ );
- Amplificatore: bicanale modello SU-A900 di fabbricazione Technics;
- Microfoni: a condensazione GRAS 40AR da 1/2";
- Preamplificatori: 01dB-Stell PRE12H;
- Condizionatori di segnale: 01dB-Stell Opus;
- Sistema d'acquisizione: 01dB-Stell Symphonie;
- Software d'analisi: 01dB-Stell dBBATI32.

## 4. RISULTATI DELLE CAMPAGNE DI MISURA

### Misura dell'isolamento acustico alla trasmissione laterale normalizzato $D_{n,f}$

In tabella 1 e figura 7 sono riportati i valori in bande di un terzo di ottava dei valori dell'isolamento acustico alla trasmissione laterale normalizzato  $D_{n,f}$  misurati sia in assenza che in presenza della finitura superficiale dei pannelli grezzi.

Tabella 1: Valori in bande di un terzo d'ottava dell'isolamento acustico alla trasmissione laterale normalizzato  $D_{n,f}$  misurato per le due configurazioni di prova

freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
pav. grezzo	24,49	29,53	34,07	37,81	38,43	40,42	43,34	47,47	47,75
moquette	25,79	32,63	40,70	45,65	50,54	52,77	53,85	54,69	52,69
freq. (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
pav. grezzo	46,07	43,80	48,15	50,24	52,78	52,11	46,97	46,79	49,69
moquette	48,63	46,50	49,11	51,55	56,78	60,46	61,67	61,98	57,42
$D_{nfw}$ pavimento grezzo									47 dB
$D_{nfw}$ pavimento grezzo + moquette									51 dB

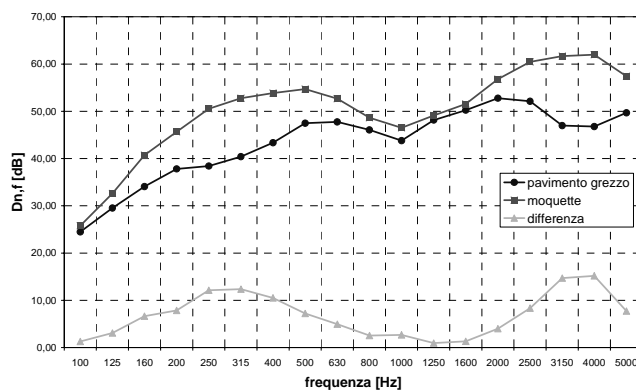


Figura 7: Andamento dell'isolamento acustico alla trasmissione laterale normalizzato  $D_{n,f}$  misurato per le due configurazioni di prova.

L'applicazione della moquette come finitura superficiale produce un miglioramento delle proprietà isolanti della struttura concentrato soprattutto alle basse (160 - 500 Hz) e alle alte (2500 - 5000 Hz) frequenze mentre alle medie frequenze l'effetto è più modesto; in termini dell'indice di valutazione  $D_{n,f,w}$  si ha un miglioramento di 4 dB con l'applicazione della moquette.

L'applicazione della finitura superficiale ha generalmente l'effetto di andare a coprire le possibili fessure che possono aversi lungo le congiunzioni dei pannelli formanti il pavimento sopraelevato; in questo caso, inoltre, non è da trascurare il fatto che la moquette possiede delle intrinseche proprietà di assorbimento sonoro che vanno ad incidere sul campo sonoro presente all'interno degli ambienti.

L'effetto dell'applicazione della finitura superficiale è ben più evidente nei confronti dell'attenuazione dei rumori impattivi, come si vedrà nel paragrafo successivo.

### Misura del livello di pressione sonora di calpestio per trasmissione laterale normalizzato $L_{n,f}$

In tabella 2 e figura 8 sono riportati i valori in bande di un terzo di ottava dei valori del livello di pressione sonora di calpestio per trasmissione laterale normalizzato  $L_{n,f}$  misurati sia in assenza che in presenza della finitura superficiale dei pannelli grezzi.

Tabella 2: Valori in bande di un terzo d'ottava del livello di pressione sonora di calpestio per trasmissione laterale normalizzato  $L_{n,f}$  misurato per le due configurazioni di prova.

freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
pav. grezzo	67,59	67,43	66,57	61,01	63,23	64,92	66,74	65,37	67,45
moquette	66,89	67,83	64,64	58,05	53,29	52,69	49,06	41,39	37,50
freq. (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
pav. grezzo	70,27	71,40	70,65	67,34	61,68	61,21	61,27	57,29	50,29
moquette	36,26	33,68	28,74	24,85	21,81	20,25	19,48	18,54	19,19
$L_{nfw}$ pavimento grezzo									71 dB
$L_{nfw}$ pavimento grezzo + moquette									55 dB

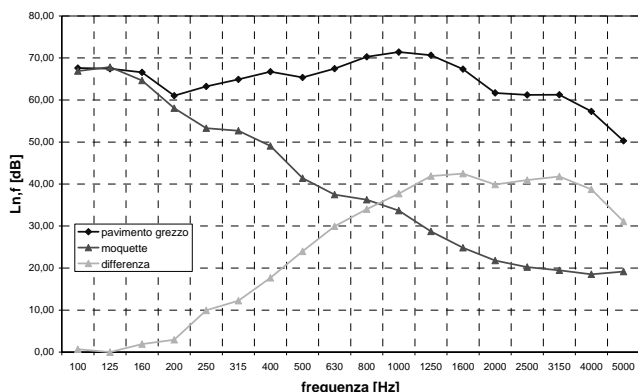


Figura 8: Andamento del livello di pressione sonora di calpestio per trasmissione laterale normalizzato  $L_{n,f}$  misurato per le due configurazioni di prova.

Come anticipato nel precedente paragrafo, l'effetto derivante dalla stesura della moquette sui pannelli grezzi produce un netto miglioramento nell'attenuazione del livello

dei rumori di calpestio, come può essere immediatamente osservato dalla variazione del valore dell'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L_{n,w}$  che passa dai 71 dB nel caso del pavimento grezzo ai 55 dB nel caso in cui è presente la moquette.

L'utilizzo di una finitura superficiale resiliente (moquette, linoleum, gomma, etc..) risulta quindi essere fortemente consigliata al fine di ottenere gli adeguati valori di attenuazione del rumore di calpestio.

### Confronto tra i risultati delle misure effettuate presso l'Università di Perugia e il CSTB

Il pavimento sopraelevato testato nelle presenti campagne di misura è stato già oggetto di precedenti sessioni di prova svolte presso il "Département acoustique et éclairage" del CSTB (Centre Scientifique et technique du bâtiment) nell'anno 2004.

Nelle figg. 9 e 10 si riportano i confronti tra gli andamenti di  $D_{n,f}$  e  $L_{n,f}$  misurati presso i laboratori dell'Università di Perugia e del CSTB. Le misure si riferiscono al solo pavimento grezzo senza finiture superficiali.

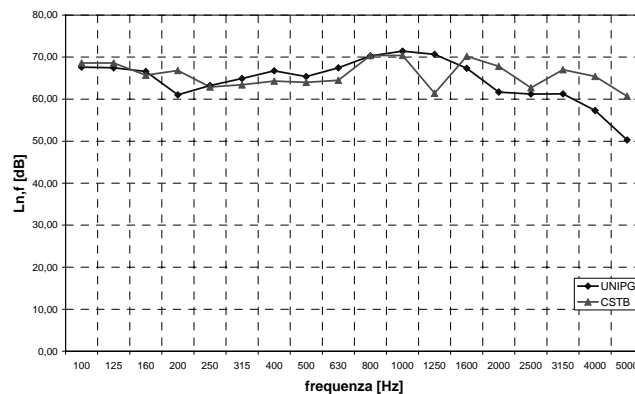


Figura 9: Confronto tra gli andamenti del livello di pressione sonora di calpestio per trasmissione laterale normalizzato  $L_{n,f}$  misurati presso l'Università di Perugia e il CSTB.

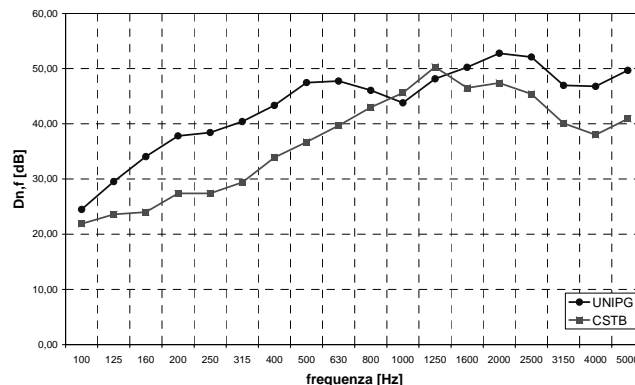


Figura 10: Confronto tra gli andamenti dell'isolamento acustico alla trasmissione laterale normalizzato  $D_{n,f}$  misurati presso l'Università di Perugia e il CSTB.

Le dimensioni delle camere di prova disponibili presso i due laboratori sono tra loro analoghe. L'altezza alla quale è montato il pavimento è, invece, differente: nella presente campagna di misura il campione è stato montato ad un'altezza

di 25 cm dal pavimento della camera a causa della cornice frapposta tra camera ricevente e emittente (fig. 2), mentre nel caso del CSTB è montato ad un'altezza di 15 cm.

Mentre i valori di  $L_{n,f}$  risultano essere simili tra loro in quasi tutto il range di frequenze esaminato (ad eccezione della banda di un terzo di ottava centrata sui 1250 Hz nella quale il valore misurato al CSTB subisce un repentino decremento, fig 9), i valori di  $D_{n,f}$  misurati durante la presente campagna di misura si mantengono sempre superiori (ad eccezione del range 1000-1250 Hz) a quelli misurati presso il CSTB (fig. 10).

Le differenze tra i valori misurati presso i due laboratori potrebbero essere dovute alla diversa altezza d'installazione dei campioni e, di conseguenza, al diverso spessore dell'intercapedine d'aria posta tra il pavimento sopraelevato e il pavimento della camera di prova; come detto in precedenza, una parete laterale e entrambe le pareti di fondo dell'intercapedine sono rivestite di materiale fonoassorbente. Il suono, propagandosi all'interno della suddetta intercapedine, viene assorbito maggiormente laddove l'altezza è maggiore poiché ciò comporta una maggiore quantità di materiale fonoassorbente presente.

Per questo motivo i risultati ottenuti presso il laboratorio dell'Università di Perugia risulterebbero essere superiori a quelli misurati dal CSTB; ciò risulta evidente alle alte frequenze per entrambe le tipologie di misure, essendo in questo range di frequenze che i materiali fonoassorbenti fibrosi utilizzati presentano le prestazioni più elevate.

Un'ulteriore eventuale causa delle differenze nei risultati ottenuti dai due laboratori potrebbe essere ricercata in una non perfetta fase di montaggio del campione e/o di allestimento della camera di prova eseguita presso i laboratori del CSTB; tale fase è stata seguita con particolare attenzione e scrupolo durante la presente campagna di misura al fine di minimizzare tutte le fonti di errore possibili, essendo proprio questa la fase più complessa di tutta la procedura contenuta nella UNI EN ISO 140-12.

## CONCLUSIONI

La procedura di misura contenuta nella normativa europea UNI EN ISO 140-12 si è rivelata essere alquanto complessa e laboriosa, non tanto per le metodologie riguardanti l'esecuzione delle misure vere e proprie (che non si discostano molto da quelle utilizzate per la misura del potere fonoisolante  $R$  di pareti o del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato  $L_n$  di solai), bensì nelle fasi di allestimento delle camere di prova.

La necessità di frapporte tra gli ambienti di misura una parete divisoria altamente isolante e di rivestire buona parte delle pareti laterali dell'intercapedine di aria formata dal pavimento sopraelevato e il pavimento della camera di prova

con materiale dalle elevate proprietà di fonoassorbimento fa sì che l'allestimento della camera di prova risulti essere oltre modo dispendioso di tempo e finanze.

Ciononostante tale metodologia permette efficacemente di simulare il comportamento di due tipici uffici o stanze adiacenti, aventi in comune un pavimento sopraelevato, con la sottostante intercapedine d'aria e una parete divisoria.

I risultati ottenuti nella presente campagna di misura mettono in evidenza da un lato la bontà della procedura utilizzata per l'esecuzione delle prove e dall'altro le buone proprietà del pavimento sopraelevato testato nei riguardi dell'isolamento dei rumori aerei e di quelli impattivi.

Risulta quindi che, oltre all'inevitabile utilità dal punto di vista funzionale (facilità di ispezzamento, riparazione e modifiche degli impianti), i pavimenti sopraelevati permettono anche di raggiungere adeguati valori di comfort acustico.

Al fine di ottimizzarne le prestazioni acustiche, risulta inoltre consigliabile l'utilizzo di una finitura superficiale resiliente (moquette nel presente caso) da porre sulla superficie dei pannelli grezzi costituenti il pavimento; in questo modo è possibile ottenere dei vantaggi molto elevati, riscontrabili soprattutto nei confronti del livello di pressione sonora di calpestio.

## RINGRAZIAMENTI

Gli Autori desiderano ringraziare la EDIL BETON Perugia S.p.A. per la fornitura dei campioni di prova e l'Ing. Augusto Ambrosi per il sostegno durante la fase di esecuzione delle misure.

## BIBLIOGRAFIA

1. UNI EN ISO 140-12, Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico dai rumori trasmessi per via aerea e dal calpestio tra due ambienti attraverso un pavimento sopraelevato, 2001.
2. UNI EN ISO 717-1, Acustica. Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Isolamento acustico per via aerea, 1997.
3. UNI EN ISO 717-2, Acustica. Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Isolamento del rumore di calpestio, 1997.
4. UNI EN ISO 354, Acustica. Misura dell'assorbimento acustico in camera riverberante, 2003.
5. F. D'Alessandro, G. Pispola, Sound absorption properties of sustainable fibrous materials in an enhanced reverberation room, Proc. Inter-noise 2005, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.

**SESSIONE**

**QUALITA' DELL'AMBIENTE COSTRUITO  
E INQUINAMENTO INDOOR**



## QUALITÀ DELL'ARIA IN AMBIENTI SCOLASTICI: VALUTAZIONE DEI LIVELLI DI CONCENTRAZIONE DI COMPOSTI ORGANICI VOLATILI (VOC) E DI MATERIALE PARTICOLATO (PM<sub>10</sub>)

Milone Angelo<sup>1</sup>, Milone Daniele<sup>1</sup>, Pitruzzella Salvatore<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento Ricerche Energetiche ed Ambientali. Università di Palermo

<sup>2</sup> Dipartimento Ingegneria Civile. Università di Messina

### SOMMARIO

Nella ricerca vengono riportati i risultati di un complesso monitoraggio effettuato in alcune aule di diversi istituti scolastici al fine di determinarne la qualità dell'aria.

Il monitoraggio, ha riguardato le concentrazioni di composti organici volatili (VOC), con particolare riferimento al benzene che per la loro tossicità sono ritenuti cancerogeni.

L'indagine è stata estesa ai livelli di concentrazione di particolato (PM<sub>10</sub>), nonché dei valori termogravimetrici, al fine di avere una completa visione dei livelli di contaminazione di un ambiente confinato.

I risultati ottenuti indicano che la concentrazione di VOC, ed in alcuni periodi dell'anno anche di PM<sub>10</sub>, nell'aria indoor è spesso più alta o simile, ai livelli di esposizione esterna.

Anche per il benzene all'interno degli ambienti si sono riscontrati livelli di concentrazioni superiori che all'esterno.

La campagna di rilevamenti, ha avuto la durata di un anno suddivisa in quattro campionamenti, ciascuno della durata di sette giorni, all'interno dei periodi climatici più rappresentativi e di utilizzo degli edifici.

### PREMESSA

Da qualche anno è in corso in Europa un progetto di ricerca volto a determinare la presenza di sostanze inquinanti quali polveri (PM<sub>10</sub>) e composti organici volatili (VOC), dei quali si conosce la pericolosità fino a ritenerli cancerogeni.

Tale progetto denominato *AIRMEX*, acronimo di Air Monitoring and Exposure Assessment Study, vuole mettere in relazione l'inquinamento outdoor e indoor presenti nei luoghi di lavoro con particolare riferimento alle concentrazioni di particolato e di alcune composti organici volatili [1].

Il gruppo di ricerca che già si è interessato delle problematiche relative alle qualità ambientali di aule scolastiche, ha portato avanti uno studio complesso, insieme a studiosi di medicina del lavoro, in alcune aule di quattro edifici scolastici, dei quali due si trovano in prossimità di strade urbane con grande traffico, e due nella periferia di Palermo, ciò per meglio individuare le correlazioni tra outdoor e indoor nelle diverse situazioni di emissioni esterne [2].

### INTRODUZIONE

Con la denominazione di composti organici volatili (VOC) vengono indicati una serie di sostanze che hanno un punto di ebollizione che va da 50/100°C a 240/260°C; tra i più noti gli idrocarburi alifatici (benzene e derivati, toluene, xilene, stirene), gli alcoli (etanolo, propanolo, butanolo), gli esteri, i chetoni e le aldeidi (formaldeide).

Per indicare la complessa composizione di tali composti viene adoperata la sigla VOC<sub>(t)</sub> (Composti organici volatili totali).

Negli ambienti confinati ed in particolare per gli ambienti scolastici le sorgenti in grado di formare tali composti sono:

- Prodotti per la pulizia dei pavimenti e dei vetri;
- Pitture e vernici a spirito, detergenti e sverniciatori;
- Mobili e tessuti;
- Apparecchi di riscaldamento (specie quelli ad aria);
- Volatilizzazione dai bagni;
- Sorgenti outdoor (emissioni da veicoli o industriali).

Gli effetti sanitari dovuti ad esposizione ai VOC spesso sono di tipo acuto e cronico, possono agire sul sistema nervoso come depressivi, il diclorometano e lo stirene sono ritenuti probabilmente cancerogeni [3], [4].

Alcuni studiosi hanno trovato evidenti relazioni tra alcuni sintomatologie da *sindrome di edificio malato* meglio conosciuto come *Sick Syndrome Building* (SBS) e la presenza di VOC [5], [6].

Nel presente studio l'attenzione viene posta al benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), che rappresenta fra tutti quello più volatile, insolubile nell'acqua e definito dallo IARC (*Agency for Research on Cancer*) come inquinante ubiquitario e cancerogeno per l'uomo.

Proviene per circa il 90% dal processo di combustione degli autoveicoli mentre la rimanente parte da processi industriali e dall'evaporazione di combustibili liquidi e solidi.

Contrariamente ad altri composti volatili presenta una elevata stabilità chimica per cui tende a permanere nei bassi strati dell'atmosfera e quindi degli ambienti indoor, senza subire degradazioni. Da ciò la tendenza ad un bioaccumulo negli ambienti.

Il materiale particolato presente nell'aria è costituito da una miscela di particelle solide e liquide, che possono rimanere sospese in aria anche per lunghi periodi.

Tali particelle sono comprese tra 0.005 µm e 50-150µm (lo spessore di un capello umano è circa 100 µm), e sono costituiti da una miscela di elementi quali: carbonio, piombo, nichel,

nitriti, solfati, composti organici, frammenti di suolo, ecc.

L'insieme delle particelle sospese in atmosfera è definito come PTS (polveri totali sospese) o PM (materiale particolato) [10].

Le polveri totali vengono generalmente distinte in due classi dimensionali corrispondenti alla capacità di penetrazione nelle vie respiratorie da cui dipende l'intensità degli effetti nocivi [11]. Le polveri che penetrano nel tratto superiore delle vie aeree o tratto extratoracico (cavità nasali, faringe e laringe), polveri dette inalabili o toraciche, hanno un diametro fino a 10µm (PM<sub>10</sub>).

Quelle invece che possono giungere fino alle parti inferiori dell'apparato respiratorio o tratto tracheobronchiale (trachea, bronchi, bronchioli e alveoli polmonari), le cosiddette polveri respirabili, hanno un diametro inferiore a 2.5µm (PM<sub>2,5</sub>).

Le particelle solide sono originate sia per emissione diretta (particelle primarie) che per reazione nell'atmosfera di composti chimici, quali ossidi di azoto e zolfo, ammoniaca e composti organici (particelle secondarie).

Le sorgenti del particolato possono essere antropiche e naturali: le prime sono riconducibili principalmente ai processi di combustione quali: emissioni da traffico veicolare, utilizzo di combustibili (carbone, oli, legno, rifiuti, rifiuti agricoli), emissioni industriali (cementifici, fonderie, miniere), le seconde sono sostanzialmente: aerosol marino, suolo risollevato e trasportato dal vento, aerosol biogenico, ecc.

Le cause principali delle alte concentrazioni di polveri in ambito cittadino sono dovute in gran parte alla crescente intensità di traffico veicolare, e in particolare alle emissioni dei motori diesel e dei ciclomotori [12].

Un ulteriore elemento che contribuisce alle alte concentrazioni di polveri è connesso anche al risollevamento delle frazioni depositate, per cause naturali o legate allo stesso traffico.

Gli effetti sanitari delle PM<sub>10</sub> possono essere sia a breve termine che a lungo termine, in particolare le particelle di dimensioni maggiori provocano effetti di irritazione e infiammazione del tratto superiore delle vie aeree, quelle invece di dimensioni minori (inferiori a 5-6 micron) possono provocare e aggravare malattie respiratorie e indurre formazioni neoplastiche.

## NORMATIVA DI RIFERIMENTO

I valori concentrazione e di esposizione degli inquinanti atmosferici individuati dalla normativa Italiana, sono definiti sulla base di indicazioni dell'OMS, e desunte dallo stato delle conoscenze sugli effetti dell'esposizione della popolazione ai singoli inquinanti.

La prima normativa in tal senso, inserita nel DPCM del 28/03/1983, riguardava i "Limiti massimi di accettabilità delle concentrazioni e di esposizione relativi ad inquinanti dell'aria nell'ambiente esterno", il successivo DPR 203/88 recepiva alcune direttive CEE in materia di qualità dell'aria.

In particolare con questa seconda norma i limiti delle concentrazioni costituivano valori di riferimento per l'istituzione di zone specifiche di protezione ambientale per le quali è necessaria una particolare tutela della qualità dell'aria.

- Le successive normative a partire da quella inserita nel D.M. 25/11/94 tende a distinguere tre valori :
- Valore limite o limite di accettabilità (concentrazioni e tempi di esposizione considerati come rischio accettabile per la popolazione);
- Valore guida (valori a cui tendere);

- Valore di attenzione o di allarme (valori gestionali per la prevenzione).

Ai fini del presente studio si riportano per il benzene e il PM10 i valori limiti riportati nel D.M. n° 60 del 02/04/2002 (Tabella 1 e 2)

Per quanto riguarda i limiti del VOC(t) , in assenza di una normativa precisa l'OMS ha fissato un valore guida di 100 µg/m<sup>3</sup> come media su 30 minuti di campionamento [7] .

Tabella 1: Valori limiti di concentrazioni di Benzene.

Benzene	Periodo di campionamento	Entrata in vigore	Valore limite
Valore limite annuale	Anno civile	01/01/2007	8 µg/m <sup>3</sup>
		01/01/2008	7 µg/m <sup>3</sup>
		01/01/2009	6 µg/m <sup>3</sup>
		01/01/2010	5 µg/m <sup>3</sup>

Tabella 2: Valori limiti di concentrazioni di PM<sub>10</sub>.

PM10	Periodo di campionamento	Entrata in vigore	Valore limite
Valore limite giornaliero	24 ore (da non superare più di 35 volte nell'anno)	01/01/2005	50 µg/m <sup>3</sup>
Valore limite annuale	Anno civile	01/01/2005	40 µg/m <sup>3</sup>

## METODOLOGIA

Sono stati individuati 4 edifici scolastici (Istituti Superiori) ed in ciascuno di essi è stata scelta una aula campione [13].

Le aule individuate consentono una presenza massima di 25 studenti più il docente.

Dei quattro edifici, inoltre, due sono all'interno del perimetro cosiddetto urbano e due più in zona periferica.

La campagna è iniziata ad Ottobre 2005, praticamente ad inizio attività scolastiche, ed ha avuto termine nel Maggio 2006, un campionamento è stato effettuato l'1 Agosto 2006, con edifici scolastici praticamente chiusi per una comparazione anche in questa condizione.

In particolare il monitoraggio è stato distinto in 4 periodi, ciascuno della durata di sette giorni (comprendendo anche la domenica), individuando così i seguenti periodi di campionamenti:

- 1° Periodo: dal 10 al 16 Ottobre;
- 2° Periodo: dal 12 al 18 Dicembre;
- 3° Periodo: dal 21 al 27 febbraio;
- 4° Periodo: dal 9 al 15 Maggio;
- Campionamento estivo: dall'1 al 7 Agosto.

Come si evince i quattro edifici individuano due differenti zone per intensità di traffico; i primi due collocati nel centro urbano sono caratterizzati da alto traffico, i secondi due ubicati in periferia sono caratterizzati da un traffico basso.

Per quanto riguarda i periodi di campionamento rappresentano anche essi due differenti modi di abitare l'aula scolastica: nel primo e nel quarto spesso le finestre sono aperte, mentre nei due rimanenti periodi sono quasi sempre chiusi.

Il quinto campionamento rappresenta un caso particolare nel quale certamente non c'è presenza di sorgenti interne, le finestre sono sempre chiuse ed il traffico per tutte e due le zone è certamente modesto.

Infine per omogeneità di campionamento le aule sono state scelte sempre a piano 1° e con finestre rivolte verso la strada.

Per quanto riguarda il campionamento dei valori esterni, poiché la concentrazione degli inquinanti atmosferici è legata alla stabilità atmosferica e questa varia tra il giorno e la notte è stato scelto un tempo di campionamento di sette giorni consecutivi.

In tal modo oltre a mediare diverse possibili situazioni atmosferiche, si è voluto includere il giorno di domenica che influisce positivamente (valori di concentrazioni più bassi) nel risultato complessivo.

Per uno studio più completo, solo per il primo edificio e per il primo periodo di campionamento, è stato eseguito un campionamento giornaliero con appositi Radielli per il rilevamento dei VOC(t) e del benzene.

## STRUMENTAZIONE

Per il campionamento e l'analisi dei composti organici volatili, compreso il benzene, è stato utilizzato un campionatore passivo (Radiello) che come si evince dalla Figura 1, si compone di un corpo cilindrico poroso di policarbonato e polietilene, che da un lato impedisce a polveri e altri corpi estranei di entrare in contatto con la cartuccia adsorbente mentre lascia passare solamente l'aria senza alterare l'analisi [14].

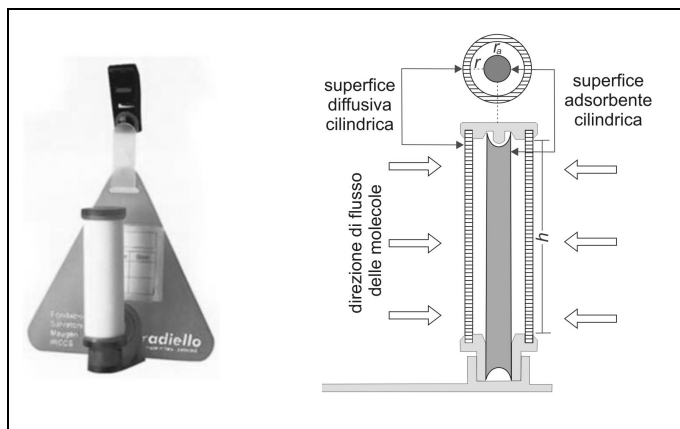


Figura 1: Schema di funzionamento di un Radiello

La cartuccia adsorbente contiene 530 mg di carbone attivo che adsorbe i VOC, i quali successivamente vengono estratti con CS<sub>2</sub> e trasferiti in un gascromatografo.

I Radielli esterni per quanto detto nel paragrafo precedente sono stati protetti da appositi ripari previsti già come accessori nella vendita degli stessi.

Questo metodo di campionamento, basandosi sul principio della diffusione molecolare non fornisce valori di concentrazione in tempo reale, ma solo le concentrazioni medie relative al periodo di campionamento, ecco perché si è scelto un periodo di campionamento pari ad una settimana.

Tale strumentazione, in funzione del potenziale di ionizzazione è in grado di rilevare tutta una serie di composti volatili ed in particolare il benzene, con un range di sensibilità da 0.01 a 10.00 mg/m<sup>3</sup>.

Con il Radiello, oltre al benzene, sono 47 le sostanze individuabili, ognuna di loro, secondo la legge di Fick viene adsorbita con una velocità di uptake costante (benzene: 80 cm<sup>3</sup>/min.; toluene 74.0 cm<sup>3</sup>/min.; etilbenzene e xileni 61.1 cm<sup>3</sup>/min.).

Per il calcolo della concentrazione si utilizza la relazione sulla diffusione molecolare in aria

$$\frac{dm}{dt} = D \cdot S \cdot \frac{dC}{dl} \quad (1)$$

in cui:

$dm/dt$  indica la variazione di massa diffusa nel tempo

$D$  è il coefficiente di diffusione;

$S$  è l'area della superficie diffusiva;

$dC/dl$  indica la variazione di concentrazione  $C$  al variare della distanza  $l$  tra la superficie diffusiva e l'adsorbente;

Poiché il Radiello ha forma cilindrica la formula diventa:

$$\frac{dm}{dt} = D \cdot 2\pi r \cdot h \cdot \frac{dC}{dr} \quad (2)$$

in cui:

$r$  è il raggio di base del cilindro che costituisce il corpo diffusivo;

$h$  è l'altezza del corpo diffusivo;

Integrando si ha:

$$\frac{m}{t} = C \cdot \frac{D \cdot 2\pi r \cdot h}{\ln \frac{r}{r_a}} = Q \quad (3)$$

in cui:

$r_a$  è il raggio della cartuccia adsorbente cilindrica;

$Q$  è la portata di campionamento;

Il termine  $(2\pi r \cdot h) / (\ln \frac{r}{r_a})$  rappresenta la costante geometrica del Radiello

La concentrazione di una specie dispersa in aria si può dunque calcolare con la seguente formula:

$$C = \frac{m}{t * Q} \quad (4)$$

in cui:

$m$  è la massa di sostanza captata che viene determinata sperimentalmente;

$t$  è il tempo di esposizione del Radiello;

$Q$  è la portata di campionamento passivo.

Per il campionamento e l'analisi del PM<sub>10</sub> è stata utilizzata una testa di prelievo conforme alla normativa europea EN 12341 [15], con la quale è possibile prelevare una portata d'aria costante di 2.3 m<sup>3</sup>/h, attraverso un separatore a impatto inerziale di cui si riporta una vista nella figura 2.

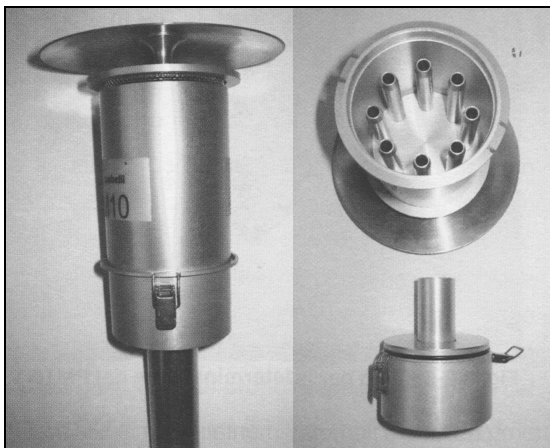


Figura 2: Testa di prelievo per PM<sub>10</sub>

L'aria così aspirata viene trasportata su un mezzo filtrante costituito da un filtro in fibra di vetro o in teflon (PTFE con porosità 2 µm), che preventivamente viene mantenuto all'interno di una cappa condizionata per 48 ore.

I filtri vengono pesati prima e dopo con bilancia microanalitica con sensibilità 0.001 mg, preventivamente calibrata.

In figura 3 si riporta un filtro prima e dopo il campionamento.

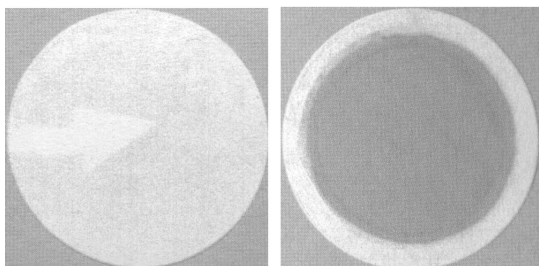


Figura 3: Filtro per la misura del PM<sub>10</sub>

Il valore della concentrazione di PM<sub>10</sub> espressa in µg/m<sup>3</sup> viene determinata attraverso la formula:

$$PM_{10} = \frac{\bar{P}_f - \bar{P}_i}{Nm^3} \quad (5)$$

In cui:

- $\bar{P}_f$  è il peso medio finale;
- $\bar{P}_i$  è il peso medio iniziale.

## RISULTATI

### Concentrazione di VOC<sub>(t)</sub> e Benzene

Nei grafici delle figure da 5 a 8 vengono riportati i valori medi settimanali delle concentrazioni di VOC<sub>(t)</sub> e di benzene, rilevate all'esterno e all'interno dei quattro edifici nei cinque periodi di osservazione.

Per omogeneità di rappresentazione i valori di VOC<sub>(t)</sub> sono rappresentati in scala 1:10.

Dall'esame dei suddetti grafici si osserva che i valori delle concentrazioni di VOC<sub>(t)</sub> e di benzene che si riscontrano

all'interno sono sempre maggiori che all'esterno, tranne che per il 5° periodo di campionamento (scuole chiuse), nel quale sono pressoché identici per i primi due edifici e inferiori per i due edifici ubicati in periferia.

Dall'esame numerico della tabella 3, si evince che le maggiori concentrazioni di VOC<sub>(t)</sub> e di benzene si hanno nel 2° edificio durante il 3° periodo di campionamento.

Tali concentrazioni hanno rispettivamente i valori di 67.0 µg/m<sup>3</sup> (VOC<sub>(t)</sub> in), di 63.4 µg/m<sup>3</sup> (VOC<sub>(t)</sub> out), 8.4 µg/m<sup>3</sup> (Benzene in), 6.9 µg/m<sup>3</sup> (Benzene out).

Dal punto di vista differenziale il maggior incremento di VOC<sub>(t)</sub> fra l'esterno e l'interno si è verificato nel 1° edificio durante il 4° periodo di campionamento (9-15 Maggio) con un aumento del 30.9% (da 48.5 a 63.5 µg/m<sup>3</sup>).

Per il benzene invece il maggior incremento si è avuto nel 2° edificio durante il 1° periodo di campionamento (10-16 ottobre) con un aumento del 25.4% (da 6.3 a 7.9 µg/m<sup>3</sup>).

Tale circostanza viene giustificata dal fatto che gli studenti dell'aula campione aprivano continuamente le finestre, adducendo a motivo di una elevata temperatura interna (l'aula è esposta ad Est e quindi soggetta ad irraggiamento solare mattutino).

Nella figura 4 infine si riporta il profilo gascromatografico del Radiello relativo al primo campionamento del 1° edificio.

Tabella 3: Concentrazioni medie settimanali di VOC<sub>(t)</sub> e Benzene Outdoor e indoor rilevati nei 5 periodi di rilevamento

Edificio	Campionamento	VOC <sub>(t)</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		Benzene (µg/m <sup>3</sup> )	
		Out	In	Out	In
1	1	47.2	56.4	6.4	6.9
	2	49.4	58.0	6.8	8.2
	3	56.9	66.6	6.8	8.4
	4	48.5	63.5	6.8	7.5
	5	<b>40.4<sup>A</sup></b>	<b>40.2<sup>A</sup></b>	5.4	5.3
2	1	48.5	57.2	<b>6.3<sup>A</sup></b>	<b>7.9<sup>A</sup></b>
	2	50.2	62.0	6.8	8.4
	3	<b>63.4<sup>+</sup></b>	<b>67.0<sup>+</sup></b>	<b>6.9<sup>+</sup></b>	<b>8.4<sup>+</sup></b>
	4	49.5	56.0	6.0	6.8
	5	41.2	40.2	5.8	5.6
3	1	35.2	39.4	6.0	7.0
	2	34.8	40.2	5.5	6.8
	3	34.9	40.3	5.8	6.9
	4	40.2	44.3	6.2	7.1
	5	32.3	31.8	4.8	4.4
4	1	34.8	39.6	5.7	6.9
	2	36.2	41.4	5.9	7.1
	3	38.4	42.0	6.2	7.3
	4	35.6	40.6	5.6	6.8
	5	33.7	32.0	5.2	4.6

<sup>+</sup> Massimo valore rilevato; <sup>A</sup> Massimo differenziale

L'esame congiunto dei grafici e dei dati climatici riportati nella tabella 2 chiariscono come mai si sia avuto lo spostamento del maggior differenziale per il benzene dal 3° al 1° periodo.

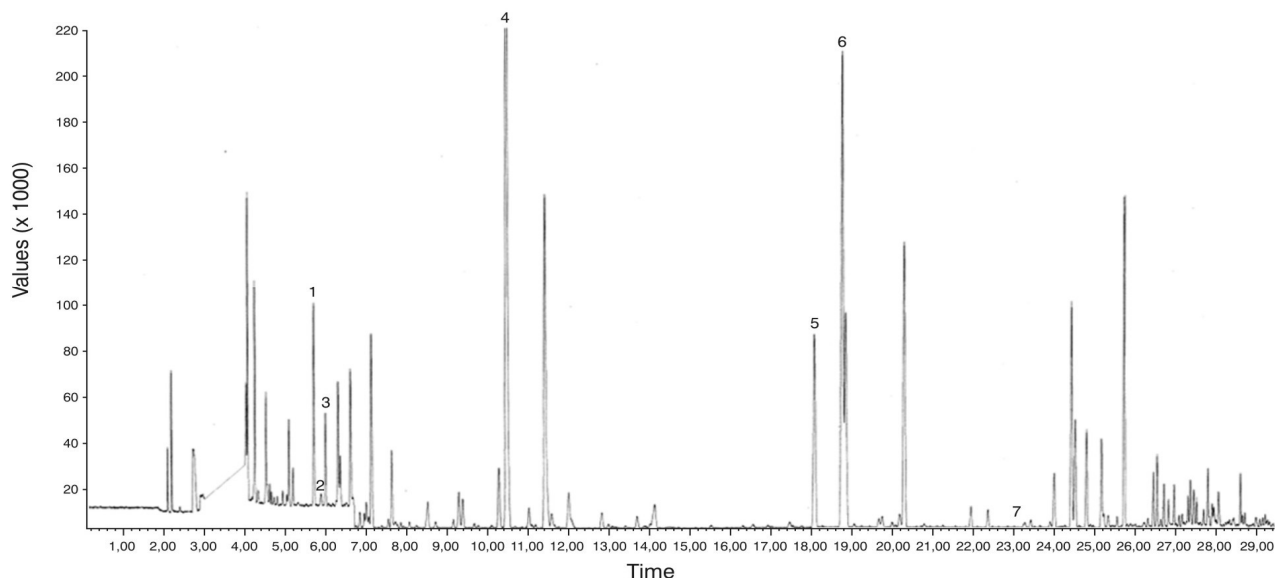


Figura 4: Profilo gascromatografico tipico degli inquinanti rilevati in un ambiente indoor.

1) Benzene; 2) 1-Butanolo; 3) Cicloesano; 4) Toluene; 5) Etilbenzene; 6) m-Xilene; 7) Benzaldeide

Tabella 4: Condizioni climatiche, esterne e interne, come media settimanale, nei cinque periodi di osservazione.

Data	T <sub>e</sub> (°C)	T <sub>i</sub> (°C)	Φ <sub>e</sub> (%)	Φ <sub>i</sub> (%)	V <sub>m</sub> (m/s)	Pioggia
10-16 ott.	18.2	21.0	58.0	50.0	1.4	-
12-18 dic.	11.4	19.8	76.8	55.0	2.4	SI
21-27 feb.	10.5	20.2	64.0	59.0	1.8	-
09-15 mag.	17.8	20.1	58.0	51.0	2.0	-
01-07 ago.	31.0	33.2	57.0	45.0	1.1	-

Nelle figure da 8 a 11 si è voluto rappresentare l'andamento giornaliero (per semplicità solo dell'edificio 1 e per il 1° periodo di campionamento) per le condizioni esterne-interne sia per i VOC<sub>(t)</sub> che per il benzene.

Si osserva che mentre all'esterno i valori rimangono pressoché costanti nella settimana (eccetto che per la domenica dove si ha un notevole abbattimento delle concentrazioni), all'interno e soprattutto per i VOC<sub>(t)</sub> si ha un incremento quasi costante dal lunedì al sabato; in particolare per i VOC<sub>(t)</sub> si ha un incremento da 50.1 a 59.9 μg/m<sup>3</sup> pari al 30% mentre per il benzene si ha un incremento da 6.5 a 7.3 μg/m<sup>3</sup> pari all'11%.

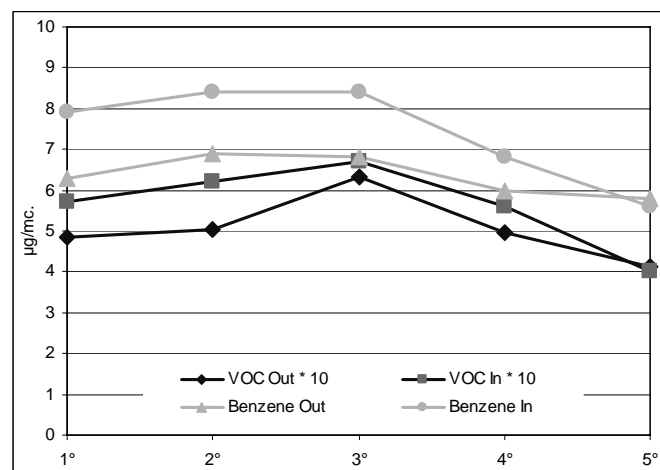


Figura 6: Concentrazioni di VOC<sub>(t)</sub> e Benzene nell'edificio 2.

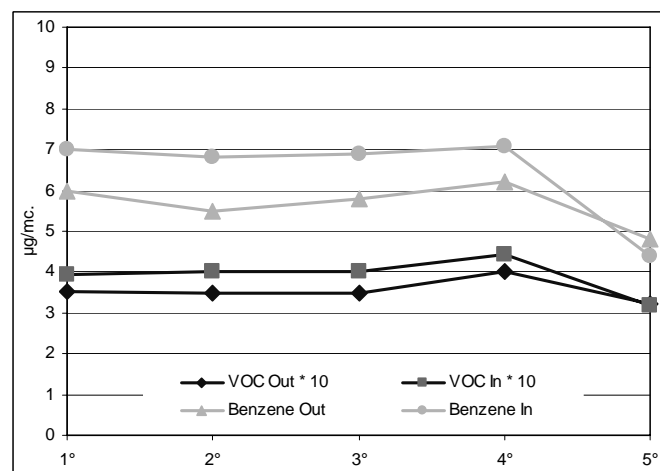


Figura 7: Concentrazioni di VOC<sub>(t)</sub> e Benzene nell'edificio 3.

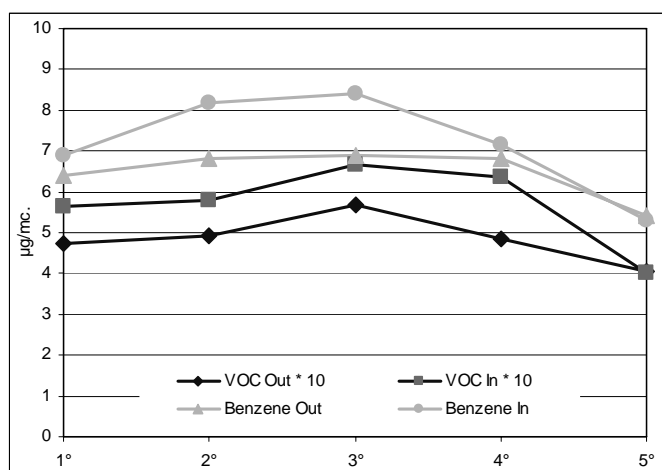


Figura 5: Concentrazioni di VOC<sub>(t)</sub> e Benzene nell'edificio 1.

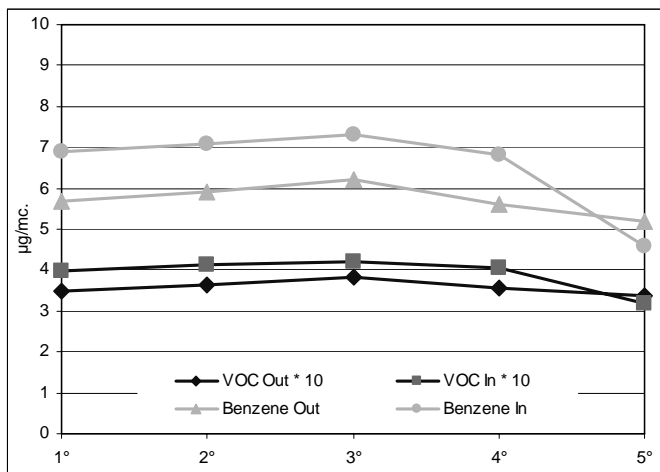


Figura 8: Concentrazioni di VOC (t) e Benzene nell'edificio 4.

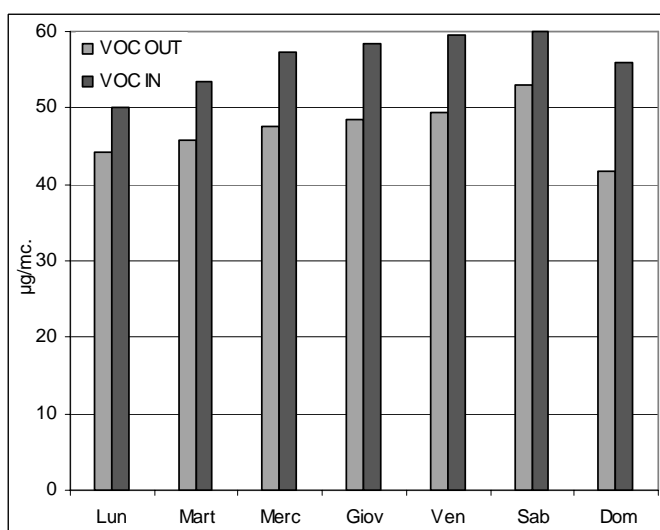


Figura 9: Distribuzione statistica di VOC(t) outdoor e indoor nell'edificio 1 nel 1° campionamento.

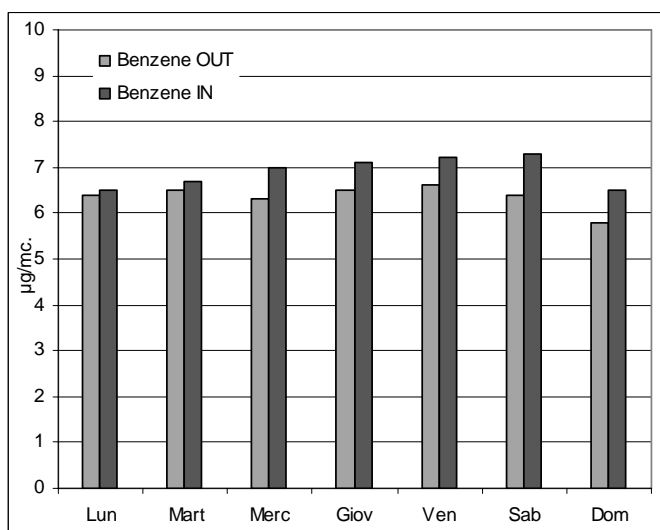


Figura 10: Distribuzione statistica di Benzene outdoor e indoor nell'edificio 1 nel 1° campionamento.

Tabella 5: Concentrazioni giornaliere di VOC(t) e Benzene Outdoor e indoor rilevati nell'edificio 1 nel 1° periodo di rilevamento

Edificio	Giorno	VOC(t) (µg/m³)		Benzene (µg/m³)	
		Out	In	Out	In
1	Lunedì	47.4	50.1	6.4	6.5
	Martedì	47.6	53.5	6.5	6.7
	Mercoledì	47.7	57.4	6.3	7.0
	Giovedì	48.4	58.5	6.5	7.1
	Venerdì	47.5	59.6	6.6	7.2
	Sabato	47.0	59.9	6.4	7.3
	Domenica	44.8	56.0	5.8	6.5

### Concentrazione di PM<sub>10</sub>

Nei grafici delle figure da 11 a 14 e nella tabella 6 si riportano i valori delle concentrazioni di particolato PM<sub>10</sub> per i quattro edifici rilevati all'esterno e all'interno, nei cinque periodi di campionamento.

L'esame di tali grafici mostra che i valori interni non si discostano da quelli esterni, con lievi aumenti nel 1° periodo per i due edifici ubicati nel centro urbano.

Nel 5° periodo di campionamento (scuole chiuse) si rilevano valori di concentrazioni indoor decisamente bassi.

Dal punto di vista numerico le maggiori concentrazioni interne si hanno nel 1° edificio durante il 1° periodo di campionamento (10-16 ottobre) dove si raggiungono i 43.2 µg/m³.

Tabella 6: Concentrazioni medie settimanali di PM<sub>10</sub> Outdoor e Indoor rilevati nei 5 periodi di campionamenti.

Edificio	Campionamento	PM <sub>10</sub> (µg/m³)	
		Out	In
1	1	42.0	43.2
	2	41.0	40.2
	3	39.0	38.5
	4	39.5	39.5
	5	36.0	30.8
2	1	40.8	42.5
	2	40.0	39.5
	3	38.0	36.0
	4	40.0	41.0
	5	33.0	26.0
3	1	39.0	39.0
	2	38.5	39.5
	3	37.0	39.0
	4	38.5	39.0
	5	33.0	27.0
4	1	38.0	38.5
	2	36.5	38.5
	3	34.0	36.0
	4	39.0	39.5
	5	32.0	24.0

Anche in questo caso rimane valida la considerazione fatta precedentemente e cioè che le finestre venivano spesso aperte.

Dal punto di vista differenziale da segnalare l'elevata diminuzione di concentrazione di PM<sub>10</sub> nel 5° periodo di campionamento quando le scuole erano chiuse.

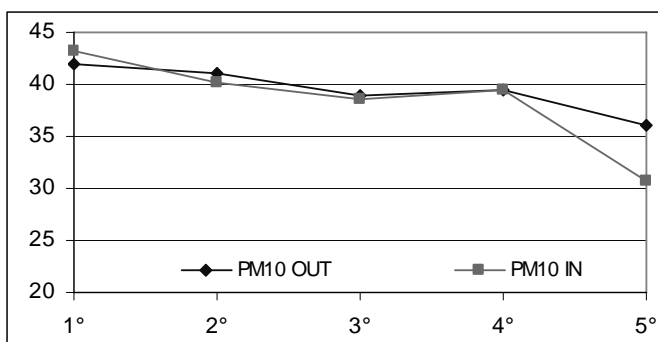


Figura 11: Concentrazione PM10 Edificio 1.

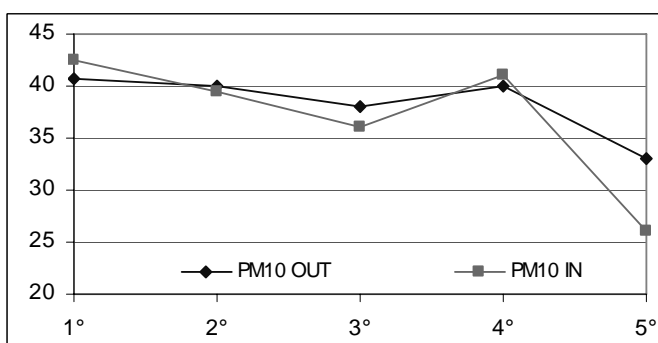


Figura 12: Concentrazione PM<sub>10</sub> Edificio 2.

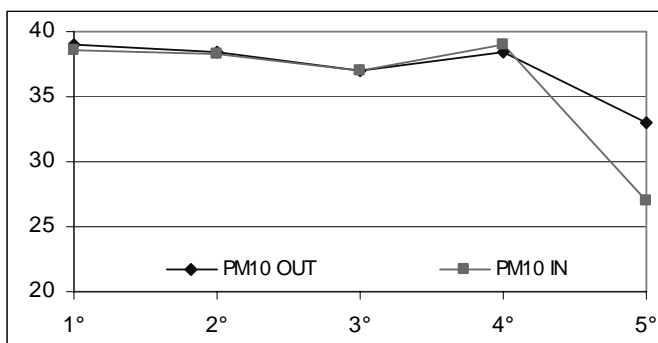


Figura 13: Concentrazione PM<sub>10</sub> Edificio 3.

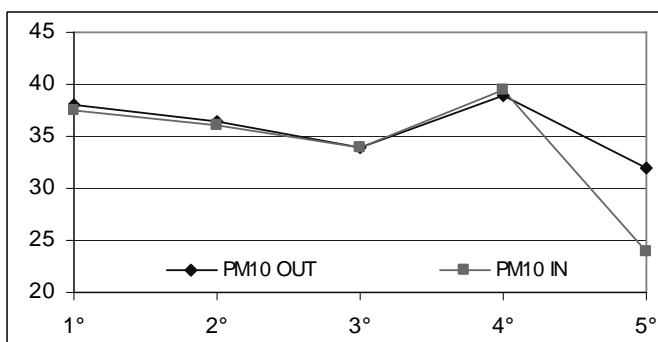


Figura 14: Concentrazione PM<sub>10</sub> Edificio 4.

## CONCLUSIONI

Lo studio ha certamente confermato quanto riportato in letteratura e cioè che spesso all'interno degli ambienti di lavoro si ha un aumento, rispetto all'esterno, delle concentrazioni di VOC<sub>(t)</sub>, mentre per il particolato le concentrazioni all'interno si attestano ai valori che si riscontrano all'esterno.

Nel caso specifico dello studio presentato e con riferimento alle normative e raccomandazioni esistenti si ha che le concentrazioni rilevate di composti organici volatili sono sempre al di sotto di quelli consentiti, così come sostanzialmente si ha per il particolato.

Valori eccedenti il valore limite consigliato a partire dall'01/01/2007 si ha quasi sempre per il benzene, con valori rilevanti per i primi due edifici ubicati nel centro urbano ove il notevole traffico favorisce l'accumularsi del benzene.

È bene aggiungere comunque che per valutare gli effetti sanitari associati sarebbe necessario misurare sperimentalmente l'esposizione personale.

I risultati sono ancora confrontabili con quelli ricavati dall'OMS in numerose località Europee, nelle quali si riscontrano quasi sempre valori interni di concentrazioni superiori a quelli esterni, così come sono mediamente confrontabili con i rilevamenti effettuati su scala annuale dal Comune di Palermo.

## BIBLIOGRAFIA

1. Institute for Health and Consumer Protection. European Commission, Directorate General Joint Research Centre. (2005). *European Indoor Air Monitoring and Exposure Assessment Project. Report 1.*
2. Milone A., Baimonte V., Campione F., Milone D., Pitruzzella S., (2004) *Valutazione dei livelli di monossido di carbonio in ambiente scolastico: un caso di studio.* In Atti del 4 Congresso Nazionale CIRIAF.
3. Maroni M., (2000), *Gli inquinanti dell'aria negli ambienti interni, l'allergia e gli effetti sulla salute.* L'AntiAsma;
4. Boutin C, Schlessler M, Frenay C, (1998), Astoul PH., *Malignant pleural mesothelioma Eur Respir J*;12.
5. Brinke J. T., (1995), *VOC Exposure Metrics and "Sick Building Syndrome"*. CBS Newsletter.
6. Molhave L., (1990) *Volatile organic compounds, indoor air quality and health.* Indoor Air Ö90. Proceedings of the 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Toronto, Volume 5.
7. WHO, (2000), *Air Quality Guidelines for Europe,* WHO Regional Publications, European Series, No. 91, Second Edition.
8. Gazzetta Ufficiale n. 87 del 13-4-2002. Supplemento Ordinario n. 77. DECRETO 2 aprile 2002, n.60. *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 dell'aria ambiente per il benzene ed il monossido di carbonio.*
9. EU- *Directive 2000/69/EC of the European Parliament and of the Council of 16 November 2000 relating to*

- limit values for benzene and carbon monoxide in ambient air.*
10. AEA Technology, UK NAEI *National Atmospheric Emissions Inventory* NAEI-NETCEN, <http://www.naei.org.uk/>, febbraio 2003.
  11. Katsouyanni K, Touloumi G, Spix, *et al.* (1997) *Short-term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project.* Air pollution and Health a European Approach.
  12. APEG, (1999) *Source Apportionment of Air Particulate Matter in the United Kingdom* - Airborne Particles Expert Group for DETR (Department of the Environment, Transport and the Regions).
  13. Carrer, P, Bruin, Y.B.d., Franchi M. and Valovirta E (2002), *The EFA project: Indoor air quality in European schools.* Proceedings of Indoor air 2002. Santa Cruz.
  14. Cocheo, V., Boaretto, C. and Sacco, P. (1996). *High Uptake Rate Radial Diffusive Sampler Suitable for Both Solvent and Thermal Desorption.* Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 57, pp 897-904.
  15. UNI EN 12341:2001. *Qualità dell'aria-Determinazione del particolato in sospensione PM<sub>10</sub> - Metodo di riferimento e procedimento per prove in campo atte a dimostrare l'equivalenza dei metodi di misurazione rispetto al metodo di riferimento.*

## ANALISI ENERGETICA, ECONOMICA ED AMBIENTALE DI EDIFICI SCOLASTICI: VERSO L'ATTESTAZIONE ENERGETICA

Cristina Carletti, Fabio Sciarpi

Dipartimento TAeD, via san Niccolò 93, 50125 Firenze  
tel. 055-2491538 - fax. 055-2347152 - e-mail: lab.ambientale@taed.unifi.it

### SOMMARIO

Scopo della presente memoria è quello di definire, in riferimento alla riqualificazione energetica di edifici scolastici esistenti, una metodologia di analisi che consenta di avere un panorama completo delle prestazioni del sistema edificio - impianto in vista della futura certificazione energetica dell'edificio, ed al contempo individuare le relazioni fra differenti target energetici, in accordo con la filosofia della Direttiva 2002/91/CE e del D. Lgs. 192/2005 (corretto ed integrato dal D. Lgs. 29 dicembre 2006, n.311), e gli investimenti necessari per raggiungerli, espressi, oltre che in forma assoluta, anche in termini di tempo di ritorno.

Nella ricerca, dopo una dettagliata analisi sulle caratteristiche energetiche (consumi rilevati) e di comfort relative ad edifici scolastici di differenti comuni italiani, sono state simulate e confrontate differenti strategie di miglioramento energetico dell'involucro necessarie per raggiungere diversi target energetici; infine viene riportato un confronto parametrico dei risultati ottenuti al fine di evidenziare, mediante l'uso di un numero limitato di indicatori energetici, il rapporto fra extra costi di costruzione, target energetico raggiunto e conseguenti risparmi di gestione e quantità di CO<sub>2</sub> non immessa in ambiente.

Nella memoria vengono riportati i risultati relativi ad un caso studio situato nel Comune di Lucca.

### INTRODUZIONE

Il tema della riqualificazione energetica di un edificio esistente, sia esso a destinazione residenziale, terziaria o scolastica, finalizzata al raggiungimento di un target tipico degli edifici a basso consumo è estremamente complesso e non sempre attuabile. Non tutti gli edifici, infatti, si prestano a questo tipo di intervento.

Per riqualificare in modo soddisfacente un edificio devono essere considerati alcuni aspetti, quali la tipologia edilizia, la compattezza, la morfologia dell'edificio, e si devono focalizzare i limiti che l'edificio stesso possiede per una tale ristrutturazione. Infatti, in primo luogo è richiesta una forma il più compatta possibile, che ottimizzi il rapporto tra superficie disperdente e il volume riscaldato, deve essere valutata la presenza e la tipologia delle superfici vetrate, ecc.; infine si deve definire con una valutazione economica appropriata, quale strategia progettuale debba essere esclusa o consigliata.

### METODOLOGIA

Il presente studio è finalizzato alla individuazione di una metodologia di analisi energetica degli edifici scolastici al fine di individuare una ipotesi di attestazione energetica e metodi di valutazione, a mezzo di indicatori, del grado di fattibilità economica di alcune strategie di riqualificazione energetica.

In particolare la ricerca si è indirizzata allo studio delle caratteristiche energetiche del comparto scolastico di alcuni comuni italiani e delle principali problematiche connesse, prendendo come contesto legislativo di riferimento quello attuale ed analizzando le implicazioni dei recenti sviluppi in materia di contenimento dei consumi energetici.

Nel dettaglio, lo studio ha seguito la seguente metodologia:

- a) individuazione dei principali indicatori energetico ambientali riferiti all'edificio scolastico;
- b) identificazione delle principali strategie di riqualificazione energetica;
- c) definizione di una metodologia di analisi energetica del parco scolastico di alcuni comuni e Province Italiane;
- d) definizione di un questionario relativo al comfort globale interno (termoigrometrico, visivo, acustico e I.A.Q.);
- e) applicazione e validazione della metodologia definita ad alcuni casi studio rappresentativi;

La metodologia di analisi energetica del parco scolastico è stata articolata in due fasi:

a) *Prima fase*: analisi del sito, analisi fotografica dettagliata dell'edificio e del contorno ambientale, analisi dei componenti dell'involucro e del sistema di climatizzazione, analisi dei consumi energetici annui (bollette).

b) *Seconda fase*: analisi fotografica approfondita dei punti critici dell'edificio, analisi con termocamera ad infrarossi (eventuale), analisi dei dati geometrici edificio (piante, prospetti, sezioni) ed analisi distributiva, analisi energetica dei componenti dell'involucro, analisi dispersioni edificio.

I risultati rispettivamente della prima e della seconda fase di indagine, per ciascun edificio analizzato, sono stati raccolti in due schede, una scheda di analisi "sintetica" (figura 1) ed una scheda "approfondita" (figura 2) che sono riportate di seguito, a titolo di esempio, per un edificio del comune di Lucca.

La raccolta di informazioni condotta fino ad ora su oltre 250 edifici di diverse comuni e province italiani (Provincia di Firenze, Comuni di Lucca, Scandicci, Arezzo, Comuni della Val di Magra, ecc.) ha permesso di schedare ed analizzare numerosissimi edifici di diversa tipologia creando un prezioso abaco di tecnologie e componenti utilizzabile in seguito per confrontare edifici energeticamente e tecnologicamente "simili" e poter programmare agilmente quelle strategie di

riqualificazione energetica, riportate anche sull'attestazione energetica dell'edificio, individuate come fattibili.

Asilo Nido "Acquario" 07																						
<b>Localizzazione:</b> Piazza Aldo Moro, 5/C Lucca. La struttura è situata in una zona prevalentemente abitata nell'immediata periferia di Lucca. È circondata su tre lati da edifici mentre l'ingresso si affaccia su Piazza Aldo Moro. L'isolato ospita anche le altre strutture scolastiche del quartiere (scuola materna, elementare, media) nonché gli impianti sportivi.																						
<b>Analisi fotografica</b>																						
<b>Analisi edificio</b>																						
<table border="1"> <tr> <td><b>Dati generali</b></td> <td>Anno di costruzione</td> <td>1983</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Superficie utile</td> <td>516 m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Numero di piani</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Altezza</td> <td>4 m</td> </tr> <tr> <td></td> <td>T/Vari</td> <td>n° 16</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Spazio verde circostante</td> <td>1700 m<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Stato di conservazione edificio</td> <td>Buono</td> </tr> </table>		<b>Dati generali</b>	Anno di costruzione	1983		Superficie utile	516 m <sup>2</sup>		Numero di piani	1		Altezza	4 m		T/Vari	n° 16		Spazio verde circostante	1700 m <sup>2</sup>		Stato di conservazione edificio	Buono
<b>Dati generali</b>	Anno di costruzione	1983																				
	Superficie utile	516 m <sup>2</sup>																				
	Numero di piani	1																				
	Altezza	4 m																				
	T/Vari	n° 16																				
	Spazio verde circostante	1700 m <sup>2</sup>																				
	Stato di conservazione edificio	Buono																				
<b>Involucro</b>	<b>Struttura portante</b> Componenti opachi Componenti finestrali	Struttura portante in acciaio Tamponamento costituito dai pannelli sandwich di polistirene inestricabile esternamente in alluminio (spessore cm 8). Solai a terra in latero-cemento. Solai di copertura in latero-cemento, isolato con polistirene espanso (Bcm), ed impermeabilizzazione con bitume. Impianto a norma di Legge, con dispositivi illuminanti di tipo fluorescente a taceo.																				
	<b>Impianti</b> Sistema di produzione calore Numero generatori Potenzialità utile Distribuzione Sistema di regolazione Terminali di emissione	Combustibile Gas metano 2 di condensazione 47 KW Tubi di rame coibentati a norma di L10/91 C-termostati climatici Fan coil																				
<b>Analisi dei consumi</b>																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Anno</th> <th>Consumo energia elettrica (kWh/anno)</th> <th>Consumo combustibile impianti termico (m<sup>3</sup>/anno)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2003</td> <td>23005,02</td> <td>10494</td> </tr> <tr> <td>2004</td> <td>25951,88</td> <td>12235</td> </tr> <tr> <td>2005</td> <td>29737,54</td> <td>6930</td> </tr> </tbody> </table>		Anno	Consumo energia elettrica (kWh/anno)	Consumo combustibile impianti termico (m <sup>3</sup> /anno)	2003	23005,02	10494	2004	25951,88	12235	2005	29737,54	6930									
Anno	Consumo energia elettrica (kWh/anno)	Consumo combustibile impianti termico (m <sup>3</sup> /anno)																				
2003	23005,02	10494																				
2004	25951,88	12235																				
2005	29737,54	6930																				

Figura 1: Esempio di scheda di analisi "sintetica"

Nelle schede sono riportati i seguenti dati: localizzazione edificio; analisi fotografica sintetica; dati relativi all'involucro ed al sistema di climatizzazione; consumi elettrici; dati geometrici e rapporto S/V; piante, prospetti e sezioni; calcolo della potenza dispersa per trasmissione, ponti termici e ventilazione.

La metodologia di analisi prevede la definizione di un abaco di soluzioni tecnologiche conformi alla riqualificazione dell'edificio che sono classificate in base alla tipologia di componente cui sono associate, alla facilità dell'intervento ed al suo costo indicativo, oltre che alle eventuali interferenze con le attività didattiche che si svolgono nel plesso. Secondo la filosofia propria del D.lgs 311/2006 ed anche della Finanziaria 2007, l'abaco delle soluzioni conformi è realizzato secondo lo schema riportato in tabella 1.

Tabella 1: Principali strategie di riqualificazione energetica

<b>Interventi sull'involucro</b>	- componenti opachi verticali ed orizzontali (pavimenti e coperture)
	- componenti finestrali (componente globale e vetri)
<b>Interventi sugli impianti</b>	- installazione di sistemi di produzione, regolazione e controllo dell'energia termica più efficienti
	- utilizzo di lampade a basso consumo energetico
	- produzione di energia da fonti rinnovabili (solare termico, fotovoltaico)

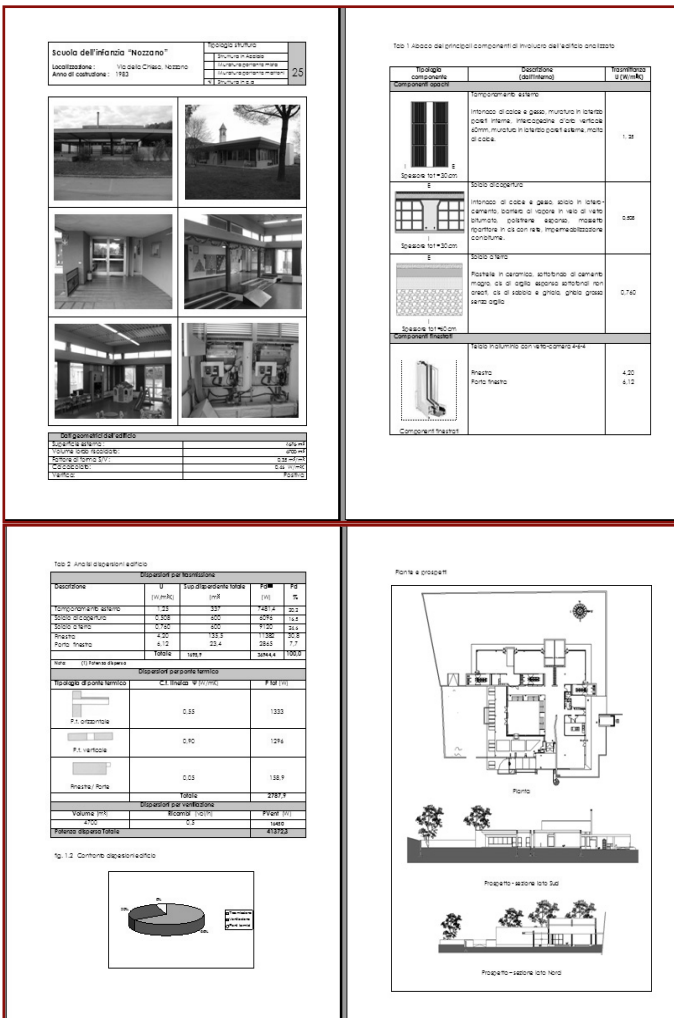


Figura 2: Esempio di scheda di analisi "approfondita"

Gli indicatori energetico ambientali individuati per la valutazione sono: l'indice di consumo energetico per la climatizzazione invernale così come definito dal D. Lgs. 192/2005 e dal D. Lgs. 311/2006, il tempo di ritorno dell'investimento, la quantità di CO<sub>2</sub> non emessa in atmosfera.

L'analisi e le valutazioni effettuate sugli edifici scolastici analizzati, hanno come finalità energetica il raggiungimento di un triplice obiettivo sulla base del quale confrontare gli indicatori utilizzati:

a) raggiungere un valore di fabbisogno energetico dell'involucro per la climatizzazione invernale (Q<sub>n</sub>) inferiore a 70 kWh/m<sup>2</sup>anno;

b) raggiungere un valore del fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale (FEP) che verifichi il FEP limite;

c) verificare i valori di trasmittanza (U) relativamente ai limiti imposti dal D. Lgs. 192/2005 al 2006 e al 2009.

A titolo di esempio, si riporta di seguito l'analisi e la verifica delle strategie di riqualificazione energetica per una scuola del Comune di Lucca.

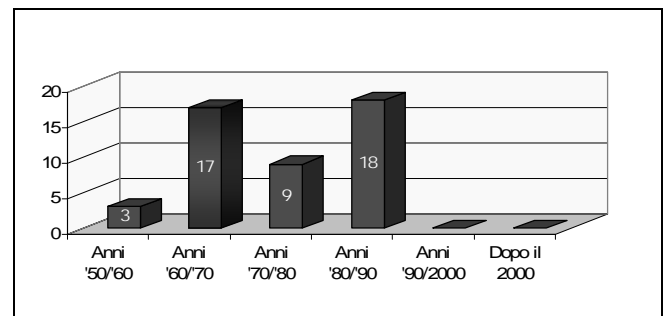


Figura 3: Datazione delle scuole del comune di Lucca

## APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA AD UN CASO STUDIO

Di seguito si riportano i principali risultati relativi all'applicazione della metodologia descritta al parco scolastico del Comune di Lucca ed in specifico ad una scuola primaria.

Il Comune di Lucca appartiene all'area della Piana di Lucca e ha sotto la sua competenza 60 scuole distribuite in 57 edifici scolastici. Le scuole sono così ripartite: 5 Asili Nido, 18 Scuole dell'infanzia, 30 Scuole primarie, 7 Scuole medie, distribuite in maniera uniforme su tutto il territorio comunale.

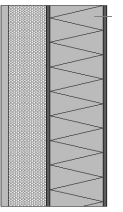
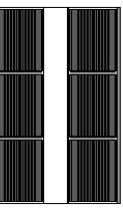
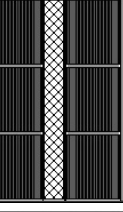

A seconda della tipologia costruttiva gli edifici scolastici analizzati nel comune possono essere suddivisi in tre gruppi:

- Edifici storici n.6
- Edifici con struttura portante in muratura di mattoni n.26
- Edifici con struttura portante in calcestruzzo armato n.23
- Edifici con struttura portante in acciaio n.3

Riunendo gli edifici storici con quelli in muratura portante, emerge che la tipologia costruttiva che incide in maniera più significativa sul territorio comunale è quella tradizionale. Il numero più consistente di edifici scolastici è quindi in muratura portante, seguito poi dalle strutture in c.a.

L'edilizia scolastica del comune ha registrato una crescita significativa dagli anni '60 fino al 1990: sono stati edificati 44 nuovi edifici scolastici; dal 1990 ad oggi non è stata costruita nessuna nuova scuola, ma sono stati effettuati numerosi interventi di ristrutturazione e ampliamento delle vecchie scuole (figura 3).

Tabella 2: Abaco delle principali tipologie di involucro opaco rilevate

	Intonaco interno di calce e gesso, pannelli di sughero cm 5, pannelli sandwich di polistirene rivestiti in alluminio. Spessore 15cm $U = 0,68 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Intonaco interno di calce e gesso, muratura in laterizio, intercapedine d'aria verticale 60mm, muratura in laterizio, malta di calce. Spessore 30cm $U = 1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Intonaco interno di calce e gesso, muratura in laterizio, lana di roccia, muratura in laterizio, malta di calce. Spessore 30cm $U = 0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Intonaco interno di calce e gesso, muratura mista pietra - laterizio, malta di calce e cemento Spessore 45cm $U = 1,41 \text{ W/m}^2\text{K}$

L'analisi delle scuole ha dimostrato come, nonostante l'entrata in vigore della L. 373/76 che imponeva l'obbligo di isolamento termico per gli edifici di nuova costruzione, non

sono state riscontrate molte differenze tra gli edifici antecedenti la 373 e quelli edificati dopo (n. 27 edifici). Ciò è dovuto alla scarsa applicazione delle disposizioni della legge e anche allo scarso controllo effettuato degli enti pubblici preposti.

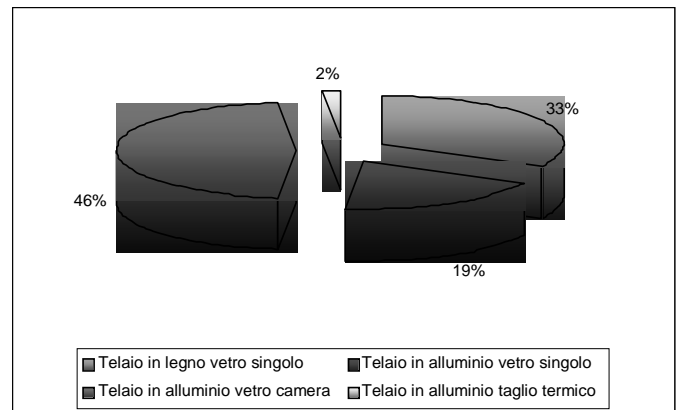


Figura 4: Tipologie di infissi utilizzati nelle scuole analizzate

Lo studio delle varie tipologie di scuole ha portato ad un dato significativo e comune a tutto il parco scolastico: i componenti di involucro opaco hanno dei valori di trasmittanza  $U$  molto elevati. Del totale delle scuole è stato rilevato che solo il 25% presenta isolamento termico sulle pareti perimetrali esterne. Le principali tipologie di tamponamento esterno delle scuole analizzate riportano infatti valori molto elevati, come si può notare dall'abaco riportato in tabella 2.

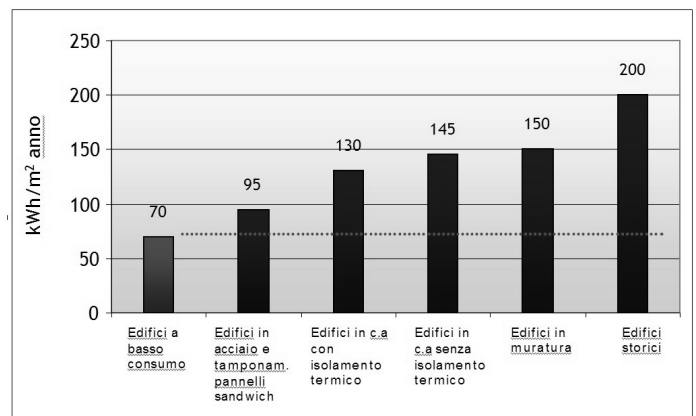


Figura 5: Media dei consumi per riscaldamento delle tipologie analizzate confrontate con quelli di un edificio a basso consumo

Dal confronto tra il limite di trasmittanza  $U$  imposto dal D.Lgs.192/2005 e le trasmittanze delle principali tipologie di componenti opache verticali delle scuole analizzate emerge che il tamponamento risulta piuttosto lontano dai limiti imposti dalla normativa vigente e necessita di una opportuna riqualificazione.

Anche gli infissi presentano valori di trasmittanza molto elevati: la maggior parte degli edifici hanno infissi con vetri singoli e laddove è montato un infisso con vetro camera siamo comunque in presenza di telai vecchi con prestazioni termiche molto basse (figura 4). Inoltre una buona percentuale di telai

(33%) sono in legno con vetro singolo e ciò causa dispersioni elevate.

Le dispersioni avvengono principalmente per trasmissione con percentuali che variano tra il 65 e l'80% delle dispersioni totali. Negli edifici in c.a. la potenza dispersa per trasmissione varia dal 65 al 75% con una presenza di dispersioni dovute a ponte termico che varia dal 5 al 7%.

Negli edifici con struttura in muratura la potenza dispersa per trasmissione varia dall'80 all'85% con una diminuzione delle dispersioni dovute a ponte termico che si aggirano intorno al 2-3%.

Questo è dovuto in primo luogo al fatto che le strutture in muratura portante non sono coibentate termicamente e quindi il tamponamento esterno presenta maggiori dispersioni; secondariamente le strutture in c.a. hanno forme più articolate e meno compatte delle strutture in muratura, e ciò giustifica una maggiore presenza di dispersioni di calore dovute a ponte termico.

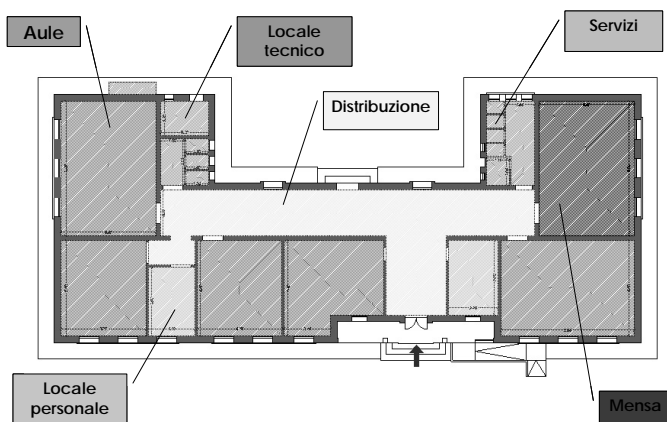


Figura 6: Planimetria e schema distributivo funzionale della scuola

Per ciò che riguarda i sistemi di produzione calore, negli ultimi 3 anni tutte le centrali termiche delle scuole sono state sostituite con caldaie a condensazione.

Alcuni impianti sono stati trasformati da Gasolio a metano o Gpl. Dall'analisi dei dettagli dei consumi delle singole scuole si nota una sensibile riduzione di m<sup>3</sup> di combustibile consumato dopo la sostituzione delle caldaie: i termini del risparmio oscillano da valori compresi tra il 20% e il 30%.



Figura 7: Alcune immagini della scuola

Uno dei casi studio sui quali è in corso di validazione la metodologia di indagine e di attestazione energetica è costituito dalla scuola primaria riportata nelle figure 6 e 7 e nella tabella 3, sulla quale sono state condotte le verifiche energetiche sopra descritte.

La costruzione, progettata dai tecnici del comune, è stata costruita nel 1950 ed ha una configurazione ad "U" quasi perfettamente simmetrica. La struttura è in muratura portante di pietra e mattoni; non presenta nessun tipo di isolamento termico ad eccezione del solaio sottotetto isolato con 5cm di lana minerale. I serramenti sono tutti in legno senza guarnizioni e con vetro semplice.

Tabella 3: Caratteristiche dell'edificio

Dati generali	Anno costruzione	1950	
	Superficie utile	450m <sup>2</sup>	
	Numero piani	1	
	Altezza	5,50m	
	Vani	6	
	Stato conservaz.	Buono	
Involucro	Struttura portante	Muratura	
	Componenti opachi	Muratura pietra e mattoni. Solaio a terra in latero cemento. Ultimo solaio in latero cemento isolato con lana minerale; manto copertura in cotto	
	Compon. finestrati	Infissi in legno e vetro semplice	
Impianto	Impianto Elettrico	A norma; lampade fluorescenti	
	Sistema produzione calore	Combustibile	Gas metano
		N. generatori	2 a condensazione
	Potenz. utile	47 kW	
	Distribuzione	Tubi ferro non coibentati	
	Regolazione	Centralina climatica	
	Terminali	Radiatori	

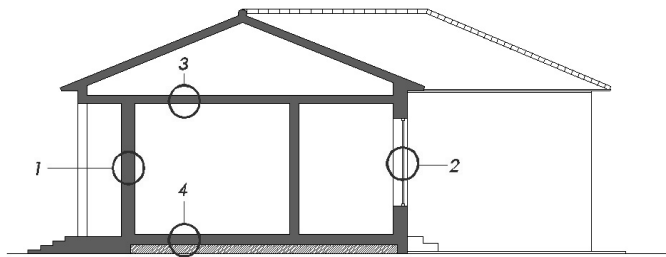
Per l'edificio esistente i valori degli indicatori energetici (Q<sub>h</sub>, FEP e η<sub>g</sub>) ottenuti attraverso una simulazione sono riportati nella tabella 4, confrontati con i valori limite imposti dal D.L.192/2005, al raggiungimento dei quali è volto l'intervento di riqualificazione proposto.

Per quanto attiene il rendimento globale medio stagionale minimo dell'impianto, questo non verifica inoltre il D.Lgs.192/2005 pur verificando a pieno il limite della L.10/1991; il sistema di generazione calore è stato infatti sostituito nel 2003 con una caldaia a condensazione.

Tabella 4: Confronto degli indici energetici dell'edificio esistente con quelli limite imposti dalla normativa vigente

	Edificio esistente	Limite imposto dal D.Lgs.192/2005
Q <sub>h</sub> (kWh/m <sup>2</sup> a)	127,41	-
FEP (kWh/m <sup>2</sup> a)	166,70	84,73
η <sub>g</sub> (%)	76,64	80,92

Le strategie di riqualificazione energetica sono state modulate in differenti interventi, schematizzati come segue:



### 1. Cappotto esterno

Per la posa del cappotto esterno l'analisi è stata condotta ipotizzando 4 soluzioni:

- a) 1A Pannelli tipo Celenit FL/150 spessore 60mm;
- b) 1B Pannelli tipo Celenit FL/150 spessore 60/80mm;
- c) 1C Pannelli tipo Celenit LS spessore 60mm;
- d) 1D Pannelli tipo Celenit P2 spessore 50mm.

### 2. Vetrocamera stratificato

e) 2A Vetrocamera stratificato tipo antinfortunistico 6-7/6/6-7

### 3. Isolamento solaio sottotetto

f) 3A Strato aggiuntivo di lana di vetro 5cm sullo strato esistente

### 4. Isolamento solaio a terra

g) 4A Posa in opera di strato di isolante termico cm 5 su pavimentazione esistente con successivo rialzo del piano di calpestio di 11cm.

Combinando le differenti strategie ipotizzate sono stati valutati n.18 interventi (tabella 5) i cui risultati in termini energetici ed economici sono riportati nella tabella 6.

Tabella 5: Descrizione sintetica delle strategie adottate

Strategia adottata	Rif.
Cappotto esterno Celenit FL/150 6cm	1A
Cappotto esterno Celenit FL/150 6÷8cm	1B
Cappotto esterno Celenit LS 6cm	1C
Cappotto esterno Celenit P2 5cm	1D
Vetro camera 6-7/6/6-7	2A
Isolamento solaio sottotetto	3A
Isolamento solaio a terra	4A
Cappotto 1D + isolamento sottotetto	5A
Cappotto 1D + vetrocamera	6A
Cappotto 1D + isolamento sottotetto + Isolamento solaio terra	7A
Isolamento sottotetto + vetrocamera	8A
Cappotto 1D + vetrocamera + isolamento sottotetto	9A
Cappotto 1B + isolamento sottotetto + vetrocamera	9B
Cappotto esterno Celenit P2 7,5cm	1E
Sostituzione infissi	2B
Isolamento solaio sottotetto 15cm lana di vetro	3B
Cappotto esterno Celenit P2 7,5cm e infissi legno alluminio con vetrocamera	6B

Tabella 6: Confronto delle strategie di riqualificazione energetica applicate al caso studio

Strategia	Difficoltà d'intervento	Tempo di ritorno (anni)	$Q_h$ (kWh/m <sup>2</sup> a)	FEP (kWh/m <sup>2</sup> a)	Verifica FEP	$U_{2006}$ (W/m <sup>2</sup> K)	$U_{2009}$ (W/m <sup>2</sup> K)
Soluzione 1A	▲	8,2	73	100	NO	SI	NO
Soluzione 1B	▲	9,3	69	100	NO	SI	NO
Soluzione 1C	▲	9,5	73	100	NO	SI	NO
Soluzione 1D	▲	6,5	73	100	NO	SI	NO
Soluzione 2A	▲	11,4	112	149	NO	SI	NO
Soluzione 3A	▲	>15	123	161	NO	SI	NO
Soluzione 4A	▲▲	>15	123	161	NO	SI	NO
Soluzione 5A	▲	8,5	69	100	NO	SI	NO
Soluzione 6A	▲	8	58	87	NO	SI	NO
Soluzione 7A	▲▲	>15	64	94	NO	SI	NO
Soluzione 8A	▲	15	108	145	NO	SI	NO
<b>Soluzione 9A</b>	▲	<b>9</b>	<b>55</b>	<b>83</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>
<b>Soluzione 9B</b>	▲	<b>10</b>	<b>52</b>	<b>79</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>
Soluzione 1E	▲	8,2	68	99	NO	SI	SI
Soluzione 2B	▲	12	102	137	NO	SI	SI
Soluzione 3B	▲	>15	121	160	NO	SI	SI
<b>Soluzione 6B</b>	▲	<b>10,3</b>	<b>58</b>	<b>80</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>
<b>Soluzione 9C</b>	▲	<b>10,2</b>	<b>40</b>	<b>64</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>	<b>SI</b>

▲ = Bassa difficoltà ▲▲ = Media difficoltà

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Dal confronto fra le strategie di riqualificazione ipotizzate è risultato che la 9A e 9B si sono rivelate, relativamente alle disposizioni per il 2006, le uniche in grado di raggiungere i due obiettivi che l'analisi effettuata si era proposta:

- Raggiungere valori di  $Q_h$  inferiori a 70 kWh/m<sup>2</sup>anno
- Verifica dei valori del FEP

L'analisi economica ha evidenziato costi ragionevoli per il tipo di intervento ipotizzato e l'analisi del tempo di ritorno ha confermato un riscontro positivo, sottolineando la validità dell'ipotesi di riqualificazione.

Dal confronto delle strategie di riqualificazione ipotizzate a mezzo dei 3 indicatori (energetico, ambientale ed economico) emerge come molti degli interventi proposti associno tempi di ritorno accettabili (inferiori o uguali a 10 anni), raggiungendo il target di edificio a basso consumo, a mezzo di soluzioni tecnologiche di facile esecuzione.

L'analisi energetica condotta sul parco scolastico di Lucca associata a valutazioni più specifiche, come quelle condotte sul caso studio, permetterà all'Amministrazione Comunale di

pianificare in maniera efficiente i necessari interventi di riqualificazione energetica sui propri immobili.

L'edificio scolastico inoltre, in quanto edificio pubblico, potrebbe, come auspicato dalla normativa sul risparmio energetico, avere la funzione di esempio per la collettività, di edificio energeticamente efficiente, vista la centralità del ruolo che ricopre.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. D.Lgs. 19 agosto 2005, n. 192 "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'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. Legge 5 agosto 1975, n. 412 "Norme sull'edilizia scolastica e piano finanziario d'intervento"

## UN APPROCCIO SOGGETTIVO ADATTATIVO PER IL COMFORT NEGLI AMBIENTI CONFINATI BASATO SU SISTEMI MULTIAGENTE

M. La Gennusa<sup>1</sup>, C. Marino<sup>2</sup>, A. Nucara<sup>2</sup>, M. Pietrafesa<sup>2</sup>, A. Pudano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DREAM – Università di Palermo, Viale delle Scienze, 98100 Palermo  
Via Graziella Loc. Feo di Vito Reggio Calabria, Italy

<sup>2</sup>DIMET – Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria  
Via Graziella Loc. Feo di Vito, 89100 Reggio Calabria

### SOMMARIO

Le condizioni di comfort all'interno degli edifici sono fortemente connesse, oltre che alle caratteristiche termofisiche e geometriche dell'involucro edilizio ed alla gestione degli impianti tecnici a supporto dell'edificio, anche al suo profilo d'uso ed alle caratteristiche psico-metaboliche-contestuali dell'utente.

Risulta pertanto estremamente appropriato formalizzare nuovi modelli di *comfort soggettivo adattativo* rispetto allo scenario ambientale, nei quali la valutazione del livello relativo venga espressa con riferimento ad un contesto globale di cui l'utente stesso è parte integrante, considerando quindi una visione multidimensionale o, per meglio dire, olistica del problema. Un approccio ottimizzato alla personalizzazione consentirebbe inoltre margini di risparmio energetico, riducendo gli sprechi legati ai consumi.

In particolare l'utilizzo di un *Sistema Multi Agente (MAS)* si presenta come la soluzione più adeguata per la valutazione dello stato di benessere, consentendo di integrare la teoria di Fanger con l'approccio adattativo proposto da altri autori (Brager e de Dear, Nicols, etc.), realizzando un impianto intelligente che sia consapevole dello scenario in cui opera l'utente e cerchi di seguirne le esigenze adattandosi al mutare delle variabili contestuali.

### INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi gli utenti esprimono chiare esigenze di servizi sempre più personalizzati ed efficienti, che siano indirizzati al raggiungimento di livelli prestazionali sempre più elevati per conseguire un miglioramento globale della qualità della vita.

Poiché la maggior parte di tali servizi sono fruiti all'interno di ambienti confinati, tale esigenza comporta una forte attenzione da parte della comunità scientifica nei riguardi della realizzazione e del mantenimento di condizioni di vita il più possibili confortevoli negli ambienti indoor.

Del resto, il complesso tema del comfort negli ambienti confinati rappresenta un argomento di profondo interesse ed attualità, costituendo da tempo il fulcro di numerose ricerche finalizzate ad un miglioramento degli standard qualitativi ed operativi ad esso inerenti.

Al momento le sfide che occorre ancora affrontare vanno dal controllo dei consumi energetici dell'edificio ad un servizio agli utenti sempre più personalizzato ed evoluto, che permetta il raggiungimento di obiettivi atti all'ottimizzazione del trading-off tra risorse impiegate, costi ed efficienza delle prestazioni energetiche, con lo scopo di garantire il massimo comfort per l'utente.

D'altra parte, la tecnica al giorno d'oggi si sta sempre più spingendo verso un panorama che non può prescindere dal porre al centro di qualsiasi sviluppo la soddisfazione dell'utente, in una visione detta di *user centered applications*.

In tal senso, la tecnologia informatica in particolare, accompagnata dalle possibilità offerte dagli sviluppi tecnologici forniti nell'ambito delle telecomunicazioni (*ICT Information and communication technology*) e dell'automazione può rivestire in futuro un ruolo fondamentale nel processo di realizzazione di livelli qualitativi

più elevati di quelli attuali nella progettazione o fruizione degli edifici.

Tali discipline possono in particolare fornire apporti preziosi in termini di miglioramento dell'efficienza e riduzione dei costi energetici, oltre a divenire strumento indispensabile per il coordinamento e lo scambio dell'ingente mole di informazioni (sia fisiche che soggettivo-contestuali) che figurano nel complesso meccanismo delle analisi ambientali.

Nasce in questo panorama il concetto di *domotica*, disciplina che si occupa dell'integrazione delle tecnologie che consentono di automatizzare ed ottimizzare operazioni all'interno delle abitazioni integrando dispositivi elettrici ed elettronici, elettrodomestici ed impianti di condizionamento, sistemi di comunicazione, controllo e sorveglianza.

In questo contesto la casa diviene un ambiente opportunamente progettato e tecnologicamente attrezzato (la cosiddetta *casa intelligente*) al fine di rendere più agevoli le attività al suo interno (accensione luci, attivazione e comando elettrodomestici, gestione climatizzazione, apertura porte e finestre, ecc.), aumentarne la sicurezza (controllo anti-intrusione, fughe di gas, incendi, allagamenti, ecc.) e consentire la connessione a distanza con servizi di assistenza (tele-soccorso, tele-assistenza, tele-monitoraggio, ecc.).

Esse risultano quindi più sicure e confortevoli, dotate di un sistema di automazione semplice, affidabile, flessibile ed economico e con un livello di comfort nettamente superiore a quello degli ambienti tradizionali.

Da quanto esposto risulta pertanto estremamente opportuno rafforzare il dialogo già esistente fra le competenze fisico tecniche e le discipline dell'automazione, caratterizzando sempre meglio un filone tecnologico che consente di gestire in maniera più avanzata il controllo delle condizioni ambientali.

D'altra parte, nella gestione e controllo degli ambienti

confinati, va emergendo in maniera sempre più pressante l'importanza del ruolo rivestito dalla soggettività e dal contesto di riferimento nella valutazione del comfort, rendendo oltremodo urgente il supporto di tecniche più complesse nella gestione delle informazioni.

In particolare quello che va attualmente maturando in ambito scientifico è la necessità di uno spostamento dall'approccio classico che analizza il binomio *edificio-impianto* ad uno più completo che tenga in conto la terna *utente-edificio-impianto*, con la conseguenza di un notevole aumento della complessità di gestione del problema.

Tenuto conto di ciò, la strada più efficace da imboccare per valutare e ricercare condizioni di benessere, cercando di mantenerle al mutare delle variabili del sistema di riferimento, sembra essere, anche alla luce di quanto emerge in letteratura, quella che persegue un approccio adattativo.

È in tal senso che l'AICARR stessa propone "la domotica e il modello adattativo come la vera rivoluzione in materia di gestione intelligente degli edifici. Costituita da un mix di tecnologie che prevede l'impiego dell'ICT e in particolare dei protocolli internet, la domotica permette la gestione degli edifici a distanza in tempo reale e può addirittura consentire di anticipare le necessità dell'edificio in termini di esigenze energetiche, climatiche e quant'altro è alla base del comfort e della sicurezza dei residenti" [1].

In questa direzione si pone pertanto la linea di ricerca presentata nel lavoro che, nell'ottica di realizzare ambienti sempre più attenti alle esigenze di benessere dell'utente, si indirizza verso l'adattatività nell'analisi del complesso sistema utente-edificio-impianto, proponendo un sistema basato sugli Agenti Intelligenti per lo sviluppo di applicazioni mirate al raggiungimento del comfort.

## COMFORT OLISTICO E BENESSERE GLOBALE DELL'UTENTE

Recenti sviluppi della scienza medica considerano il comfort come uno stato globale risultante dall'interazione di svariati ambiti o, per meglio dire, un *concetto olistico* (multidimensionale) [2], definito in letteratura medica in relazione ad aspetti psicologici, emotivi, relazionali e biologici strettamente interconnessi anche con la fisicità corporea [3-7].

Il raggiungimento di condizioni di comfort olistico permette al soggetto un alto rendimento nelle varie attività svolte ed uno stato di soddisfazione generale in relazione al contesto globale e quindi alle diverse sfere della natura multidimensionale dell'uomo.

Partendo da tali considerazioni, una definizione completa di tale tipo di comfort si trova in Kolcaba e riguarda lo stato immediato cui si tende per raggiungere rispettivamente le sensazioni di *relief*, *ease* e *transcendence* rispetto a quattro contesti di esperienza (fisico, psicospirituale, socioculturale e ambientale) [8].

Il primo tipo (*relief*) consiste nel sollievo provato nell'uscire da uno stato di discomfort locale o specifico, mentre il secondo, detto *ease*, rappresenta uno stato di benessere generale o soddisfazione che investe tutti i contesti di esperienza; infine l'ultimo stato, il cosiddetto *transcendence*, consiste in un'abilità o stato psicologico motivante e di supporto necessario per superare almeno psicologicamente lo stato di discomfort nei contesti in cui non è possibile raggiungere uno dei precedenti stati di comfort olistico [3, 7].

Tali stati di comfort si sperimentano dal punto di vista:

- *fisico*, riguardante tutte le sensazioni corporee;
- *psicospirituale*, relativo alla consapevolezza del proprio mondo interiore con tutti gli aspetti ad esso correlati (come l'autostima, il senso della propria esistenza, le motivazioni personali, etc.);
- *socioculturale*, inerente tutti gli aspetti sociali e relazionali interpersonali;
- *ambientale*, pertinente a tutto il mondo esterno in cui avviene l'esperienza umana e, quindi, riguardante i dati termoisometrici, visivi, acustici, paesaggistici, etc... [9].

Si parlerà pertanto di comfort fisico, psicospirituale, socioculturale o ambientale, a seconda dell'ambito di pertinenza del benessere specifico provato.

Ciascuno degli stati risulta fondamentale per il raggiungimento di uno stato di benessere globale: la sensazione di comfort olistico infatti, pur non risultando da una mera somma dei singoli aspetti di comfort considerati, si presenta tuttavia come una sensazione complessiva non realizzabile senza il raggiungimento del benessere nei singoli ambiti. Si ha pertanto che [2]:

- uno stato di discomfort psicologico o fisico relativo ad un determinato ambito di esperienza altera notevolmente la percezione del comfort ambientale, non permettendo la realizzazione del comfort olistico (ad esempio un utente con un elevato stato di ansia potrebbe, in uno stesso ambiente, avvertire molto più caldo rispetto ad un altro utente in uno stato di normalità emotiva);
- interventi indirizzati ad aumentare lo stato di comfort in un determinato ambito influiscono notevolmente sulla sensazione di benessere globale percepita.

Il comportamento dell'uomo è naturalmente finalizzato al raggiungimento del comfort olistico e poichè tale comfort si configura come uno stato altamente dinamico, soggetto a cambiamenti frequenti determinati dal contesto in cui l'utente si trova, ne consegue un'adattatività del soggetto al contesto di esperienza, con conseguenti reazioni finalizzate al raggiungimento del comfort stesso.

## COMFORT TERMOISOMETRICO, SOGGETTIVITÀ E DIPENDENZA DAL CONTESTO

Il comfort olistico rappresenta tuttavia uno stato difficile da raggiungere e formalizzare, per cui nel presente lavoro la trattazione verrà limitata al comfort ambientale, ponendo particolare attenzione al comfort termoisometrico.

È noto che l'organismo umano interagisce continuamente con fattori ambientali, sia riferiti all'ambiente esterno che limitati a luoghi confinati.

In particolare gli elementi più rilevanti da esaminare sono i seguenti:

- condizioni microclimatiche;
- caratteristiche strutturali dell'edificio;
- agenti fisici e chimici presenti nell'ambiente;
- attività svolta dall'individuo;
- sue abitudini lavorative e di vita in genere;
- sue caratteristiche psico-fisiologiche-metaboliche.

L'obiettivo è mantenere sempre l'utente in condizioni di comfort nonostante le variazioni delle variabili contestuali, garantendo una reattività del sistema in real-time, e riducendo drasticamente la percentuale di persone insoddisfatte (PPD) che si trovano nell'ambiente.

Per realizzare tale obiettivo, come si è detto, strumenti innovativi quali l'intelligenza artificiale e l'uso degli agenti intelligenti e dell'ICT si mostrano particolarmente efficaci, consentendo di creare un sistema reattivo alla caratterizzazione e alla mutazione del contesto di esperienza. Il sistema di controllo dell'ambiente confinato permette infatti di effettuare costantemente un trading-off tra le risorse disponibili e l'obiettivo preposto, inteso come comfort personalizzato per il singolo utente e per il contesto specifico di riferimento.

Anche per quel che riguarda in dettaglio l'aspetto termoisometrico, utilizzando come base di partenza la definizione di benessere termoisometrico fornita dall'ASHRAE [10]: "condizione della mente in cui il soggetto esprime soddisfazione verso il microclima circostante, cioè condizione dell'individuo tale che egli non desideri avere né più caldo né più freddo", si evince immediatamente l'importanza di un giudizio soggettivo da parte dell'occupante circa l'ambiente in cui si trova.

Inoltre, la stessa equazione di bilancio del corpo umano fornita da Fanger [11]

$$f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_{ar}, t_r, t_{sk}, E = 0), \quad (1)$$

che risulta funzione di diverse variabili, alcune delle quali ambientali oggettive (temperatura, umidità e velocità dell'aria, temperatura media radiante) ed altre soggettive, legate a scelte individuali (resistenza termica dell'abbigliamento) o a parametri fisiologici costitutivi del metabolismo della persona e dell'attività svolta (tasso metabolico, potenza dispersa per evaporazione attraverso la pelle, temperatura della pelle), sancisce tale soggettività.

Una tale relatività di giudizio comporta che ambienti con medesime caratteristiche microclimatiche possano produrre valutazioni sul comfort sensibilmente diverse a seconda dell'utente considerato e del contesto in cui vengono espresse.

Oltre che tra persone distinte poste nelle stesse condizioni ambientali, la valutazione può anche risultare differente per il medesimo utente, a fronte di identiche condizioni termoisometriche oggettive, per condizioni psico-emotivo-metaboliche diverse.

Quanto esposto ribadisce quindi l'importanza sempre maggiore che va attribuita al ruolo della soggettività e del contesto di riferimento già a partire dalla valutazione del comfort termoisometrico.

Infine non da ultimo va considerato come metodologie di analisi che mantengano l'utente al centro di qualsiasi applicazione consentono alla collettività anche non trascurabili benefici di carattere energetico-economico.

## VERSO UN APPROCCIO SOGGETTIVO ADATTATIVO

Considerata la complessità del tema trattato e le diverse implicazioni interrelate, si è detto come un approccio adattativo si presenti come la strada più efficace da seguire per valutare e ricercare condizioni di comfort, cercando di mantenerle al mutare delle variabili del sistema di riferimento.

In particolare vari sono i tipi di adattatività che possono presentarsi [12-15]:

- adattatività *fisica-comportamentale*, che riguarda tutti gli aspetti in relazione ai quali un utente può reagire fisicamente o con il proprio comportamento per migliorare le condizioni di comfort; si realizza

attraverso azioni su se stesso e sul proprio abbigliamento (adattatività reattiva, ad esempio cambiando postura, gli abiti, etc.) oppure sull'ambiente in cui esso si trova (adattatività interattiva, ad esempio aprendo una finestra, etc.) [16];

- adattatività *fisiologica*, che riguarda la risposta messa in atto dall'organismo per minimizzare lo stato di discomfort, tendendo a tale stato, secondo il principio della cosiddetta 'acclimatizzazione fisiologica' (si manifesta soprattutto in ambienti severi);
- adattatività *psicologica*, che è relativa agli effetti delle variabili culturali e cognitive e descrive il modo in cui le abitudini e le aspettative dell'utente alterano la percezione dello stimolo sensoriale climatico e la relativa reazione ad esso [12, 17].

L'adattatività fisica, fisiologica e psicologica dell'utente influisce notevolmente sulla percezione dello stato di comfort/discomfort relativo all'ambiente in cui esso si trova [18]: molto indicativi in tal senso risultano i risultati raggiunti in letteratura in relazione ai valori assunti dal PMV e dal PPD [15, 19].

Diversi lavori mostrano infatti come la percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) basata sul calcolo teorico del PMV di Fanger e quindi su analisi di tipo deterministico, si discosti di gran lunga dalla percentuale reale di insoddisfatti (APD - *Actual Percentage of Dissatisfied*) pur nelle medesime condizioni climatiche oggettive e perfino nelle camere climatiche (d'altra parte i parametri del PMV Fangeriano vengono rilevati in camere termostatiche nelle quali l'intervento sui parametri microclimatici è limitato al tempo necessario affinché si raggiunga l'equilibrio termico).

Tale discrepanza sembra inoltre verificarsi proprio in ragione della soggettività dell'utente e, quindi, della sua adattatività fisica, fisiologica e psicologica agli stimoli di tipo ambientale [15, 18], rendendo quindi sempre più importante valutare l'influenza dei cosiddetti *non thermal factors* [12] presenti nella vita reale quotidiana (

Figura 1).

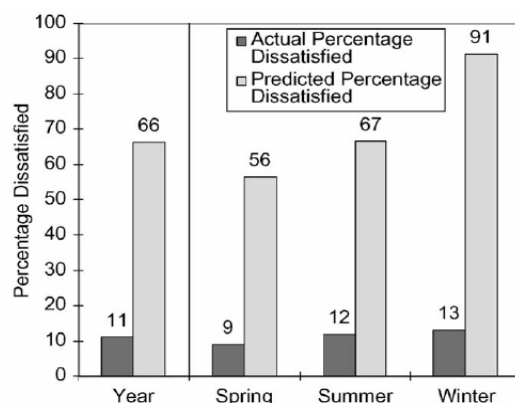


Figura 1 Discrepanze tra PPD e APD [15]

Brager e de Dear, diversi anni or sono [16], davano già ingente peso a fattori che venivano tralasciati nel modello del bilancio energetico di Fanger, (sesso, età, cultura, stato economico, etc.), contestuali (attività, stato emotivo, profilo d'uso dell'edificio, situazione contingente, etc.), interazioni con l'ambiente (aspetti illuminotecnici, acustici, di qualità dell'aria oltre che termici) ed aspetti cognitivo-psicologici (attitudini, preferenze, aspettative, etc.); anche Humphreys e

Nicol, più recentemente, hanno affermato l'inadeguatezza del metodo deterministico del PMV per predire le condizioni di comfort per gruppi di persone che vivano la quotidianità in edifici reali [20].

In definitiva, le osservazioni riportate da più parti in letteratura [21-28] evidenziano la necessità di un'evoluzione del metodo Fangeriano: il concetto nuovo che in generale emerge è la consapevolezza che, essendo la percezione dello stimolo ambientale differente da soggetto a soggetto, la reazione ad esso non si manifesta solo in relazione alla sua intensità, ma dipende strettamente anche dall'*informazione* percepita sul contesto, ossia dai dati psicologici globali dell'utente (abitudini, stato d'animo, capacità di adattamento, motivazione nel permanere in un ambiente, etc.) [15] e quindi in generale dall'ambito cognitivo-emotivo-relazionale.

Di conseguenza anche le più semplici valutazioni di comfort termoisometrico risentono di valutazioni globali sull'individuo, considerato come parte integrante di un sistema globale: in un'analisi corretta va pertanto considerata sia la storia climatica passata, sia l'aspettativa che il soggetto ha in relazione all'ambiente in cui si trova ed al contesto che sta vivendo [12].

Appare dunque insufficiente in particolare il principio di consequenzialità presente nel modello del bilancio energetico adottato da Fanger e sancito dalla relazione deterministica:

dati fisici → reazione fisiologica → comfort

divenendo l'utente piuttosto un agente attivo del sistema di osservazione che interagisce con l'ambiente circostante attraverso azioni che ne esprimono il grado di benessere.

Per un approccio più globale al problema tale relazione andrebbe quindi arricchita, pervenendo allo schema di Figura 2, che riporta la rappresentazione grafica di un modello soggettivo di percezione dello stato di comfort.

La figura evidenzia come lo scenario globale sia composto da tutte le informazioni ed i dati interscambiati tra l'ambiente fisico, l'impianto e l'edificio, filtrate dalla percezione soggettiva dell'utente che ne determina la valutazione circa lo stato di comfort.



Figura 2 Modello soggettivo di percezione del comfort

Tutti i parametri (sia termofisici, sia i non thermal factors) contribuiscono a creare una rappresentazione logica della realtà dove l'utente vive e opera, intesa come insieme globale di variabili relative all'utente ed alle sue caratteristiche psicologiche, all'impianto, all'edificio, al loro profilo d'uso, alle condizioni microclimatiche e alla specifica situazione

contestuale che si sta esaminando in real-time.

Il concetto di *scenario* evolve nel tempo attraverso diversi stati, per cui è necessaria una gestione delle informazioni perfetta e in tempo-reale per aggiornare la descrizione della realtà.

Si potrebbe dunque definire il nuovo sistema come modello di *comfort soggettivo adattativo rispetto allo scenario*.

Tuttavia l'osservazione in real-time di una situazione di questo genere e la previsione della sua evoluzione risulta un task molto complesso, poichè ai fattori climatici termofisici vanno aggiunte, per la determinazione della situazione sia di comfort termoisometrico che, a maggior ragione, di quello olistico, tutte le variabili di altro genere.

La realizzazione pratica di un modello adattativo e predittivo necessita dunque dell'introduzione di modifiche che tengano in conto in tempo reale di tutti i fattori interagenti nella determinazione del comfort in ambienti reali, in cui l'utente gioca un ruolo decisivo per il fattore soggettivo-adattativo.

D'altra parte, la stessa formulazione del PMV di Fanger presupponeva la somministrazione di questionari tramite i quali l'utente potesse esprimere il proprio voto personale sul comfort, implicando, in definitiva, che fosse lui stesso a dichiarare il proprio stato di benessere.

Partendo da questa osservazione, ne consegue l'opportunità dell'introduzione di un feedback continuo da parte dell'utente in relazione al mutare delle condizioni reali, valutando in real-time gli effetti della modifica dei parametri microclimatici e dei *non thermal factors* sulla valutazione soggettiva, riuscendo a prevederne i mutamenti.

La prima obiezione che potrebbe sorgere sarebbe relativa a come somministrare in continuo test sintetici che prendano in esame tutte le variabili contestuali relative al comfort olistico, essendo queste molteplici e di natura molto differente.

La soluzione è insita nello stesso concetto di adattatività: poiché l'uomo cerca di permanere in condizioni di comfort, ogni azione diretta sull'ambiente circostante (edificio, impianto, vestiario, etc.) rappresenta, in modo implicito, una valutazione sul comfort. Pertanto, se un utente agisce sull'impianto (ad esempio modificando la temperatura o la velocità dell'aria), appare consequenziale che lo stato in cui esso si trova sia di discomfort, così come è evidente la considerazione che qualsiasi sua azione (ad esempio apertura delle finestre) risulta finalizzata al miglioramento della propria condizione di benessere [16].

Dunque un sistema capace di *registrare* queste azioni, interpretandole e interrelandole con i dati contestuali prelevati in real-time, potrebbe seguire l'esperienza soggettiva del comfort di un utente e, dopo una fase di training, reagire alla variazione delle variabili in maniera adattativa alle scelte dell'utente stesso.

## COMFORT ADATTATIVO ED AGENTI INTELLIGENTI

Il sistema proposto è finalizzato dunque al raggiungimento del miglior compromesso tra esigenze dell'utenza, gestione dei dati e delle risorse: esso deve pertanto necessariamente garantire le condizioni di comfort con il minor consumo energetico e quindi al minor costo possibile.

A tal fine la ricerca proposta prevede lo sviluppo di un sistema modulare, che prelevi le informazioni desiderate tramite, ad esempio, sensori microambientali, eventualmente affiancati da sensori per i dati del metabolismo dell'utente e

ulteriori indicatori di informazioni relative al profilo d'uso dell'ambiente o riguardanti il vestiario e l'attività dell'utente, ecc..

A seconda della complessità può essere utilizzato un solo modulo (semplici dati termoisometrici prelevati da una qualsiasi unità HVAC) o più moduli (ad esempio, in una sala operatoria potrebbe essere utile tenere sotto controllo anche i dati metabolici-fisiologici del paziente).

Tutte le informazioni acquisite vanno memorizzate ed utilizzate per seguire l'utente in tutte le sue preferenze in relazione al comfort, arrivando a tracciare curve isoPMV totalmente personali e soggettive.

Si tratterebbe, dunque, di un impianto intelligente capace di garantire un comfort:

- altamente *soggettivo* perché l'utente verrebbe seguito in tutte le sue preferenze, registrando sia le sue esplicite valutazioni sullo stato di comfort che le sue reazioni che, implicitamente, contengono una valutazione su di esso, deducendole ed interpretandole adeguatamente;
- altamente *adattativo* perché il sistema, conoscendo le preferenze dell'utente, si adatterebbe alla sue esigenze cercando di garantirgli condizioni di comfort;
- altamente *predittivo* e *proattivo* [29] poiché esso permette di analizzare la situazione globale di esperienza e, sulla base della storia pregressa, prevedere la reazione dell'utente agendo in suo favore (proattività), prevenendone le reazioni.

La rappresentazione di un numero elevatissimo di situazioni impone che nell'analisi venga presa in considerazione un'ingente quantità di informazioni in continua evoluzione, che inarrestabilmente interagiscono nelle varie situazioni, contribuendo a definire ciò che caratterizza il mondo attorno all'utente.

L'interazione va ovviamente rapportata, oltre che alle decisioni dell'utente, anche ai vincoli in gioco relativi al contesto (ad esempio in presenza di un impianto capace solo di ventilazione non è possibile raggiungere gli stessi risultati che fornirebbe un impianto di condizionamento): è necessario pertanto creare un sistema *consapevole* che sia in grado di reagire alle differenti situazioni a seconda sia della tipologia di applicazione, attività o contesto che delle risorse disponibili.

Una conseguenza inevitabile dell'approccio seguito è tuttavia la generazione di interazioni tra i diversi utenti, poiché risultando ogni percezione altamente soggettiva, conseguentemente quelle che si presentano come condizioni di comfort per una persona potrebbero manifestarsi come discomfort per un'altra.

Considerata la complessità del sistema, un approccio tradizionale al problema, di tipo deterministico, risulta dunque improponibile: la memorizzazione di tutte le informazioni necessarie, sottoposte peraltro all'aspetto soggettivo dell'utente, non può infatti essere affidata ad un sistema tradizionale, ma piuttosto, come anticipato, è necessario attingere alla teoria dell'informazione secondo le tecniche di intelligenza artificiale ed, in particolare, di *user modeling* [30].

Di conseguenza, il connubio tra la fisica tecnica, la tecnologia delle telecomunicazioni, che fornisce gli strumenti adeguati per il prelievamento e l'interscambi di dati, l'informatica, con le nuove tecniche di Intelligenza Artificiale per il trattamento delle informazioni e l'automazione diviene nodo cruciale per implementare un sistema in grado di far fronte ad un problema complesso come questo.

In particolare la scelta effettuata prevede la realizzazione di un Sistema Multi-Agente (MAS), che per le sue caratteristiche

intrinseche si presenta come il sistema più efficace per ottenere un'effettiva adattatività allo scenario.

Di fatto, gli Agenti Intelligenti sono in grado di gestire "le informazioni in qualsiasi momento, in ogni luogo e in qualsiasi forma" [31]; inoltre, le caratteristiche intrinseche dei MAS garantiscono alta versatilità alla proposta, che consente di utilizzare il sistema sia in edifici nuovi che nei preesistenti.

Infine, considerata l'ingente mole di dati da trattare, che renderebbe impossibile l'utilizzo di un singolo sistema, complesso e centralizzato, che assuma il completo controllo della situazione, appare più opportuno prevedere un certo numero di sistemi più piccoli e autonomi per ottenere una migliore gestione globale.

## CONCLUSIONI

Nel lavoro viene proposto un nuovo modello di *comfort soggettivo adattativo rispetto allo scenario* per gli ambienti confinati, indicando con scenario la rappresentazione logica del contesto globale di esperienza dello stato di benessere percepito da parte dell'utente.

Nella gestione e controllo degli ambienti confinati va infatti emergendo in maniera sempre più pressante l'importanza del ruolo rivestito dalla soggettività e dal contesto di riferimento nella valutazione del comfort, rendendo oltremodo urgente anche il supporto di tecniche più complesse nella gestione delle informazioni.

In particolare in ambito scientifico va attualmente maturando la necessità di uno spostamento dall'approccio classico che analizza il binomio *edificio-impianto* ad uno più completo che tenga in conto la terna *utente-edificio-impianto*, con la conseguenza di un notevole aumento della complessità di gestione del problema.

Tenuto conto di ciò, la strada più efficace da imboccare per valutare e ricercare condizioni di benessere, cercando di mantenerle al mutare delle variabili del sistema di riferimento, sembra essere quella che persegue un approccio adattativo.

Partendo dagli sviluppi della scienza medica in ambito di comfort globale (o olistico), per mezzo di un attento excursus attraverso lo stato dell'arte riguardo alle problematiche che scaturiscono dal comfort Fangeriano, attraverso il lavoro viene posta in evidenza l'importanza della soggettività dell'utente nella determinazione del livello di benessere che, pertanto, diviene valutazione espressa circa un contesto globale di cui l'utente è parte integrante (il cosiddetto *scenario*).

La letteratura evidenzia infatti la discrepanza esistente tra i dati di comfort delle camere climatiche e la percezione dello stato di benessere nei contesti quotidiani in cui gli utenti operano: in queste ultime condizioni giocano un ruolo chiave i cosiddetti "non thermal factors" tra cui, in primo luogo, la soggettività dell'utente.

Appare dunque fondamentale considerare una visione multidimensionale del comfort o, per meglio dire, olistica, all'interno della quale il comfort ambientale, ed in particolare quello termoisometrico, risulta componente indispensabile per il raggiungimento di uno stato di benessere globale.

In questo contesto l'approccio adattativo del comfort si presenta come indispensabile per tenere in conto la complessa realtà di esperienza ed ottenere una reale predittività contestualizzata agli ambienti reali in cui gli utenti vivono.

Allo scopo un Sistema Multi-Agente si presenta come la soluzione più idonea al problema, utile per realizzare un sistema predittivo e adattativo al contesto che tenga in considerazione la più completa terna *utente-edificio-impianto*.

Partendo dalle teorie di Fanger del bilancio energetico ed integrandole con i principali studi sul comfort adattativo, si perviene infatti a realizzare, grazie ad un MAS, un impianto intelligente che sia consapevole dello scenario in cui opera l'utente, cercando di seguirne le esigenze adattandosi al mutare delle variabili contestuali per mantenere le condizioni di comfort soggettivo, cioè un comfort tagliato su misura per quell'utente specifico.

L'approccio si dimostra adeguato a gestire varie forme di adattatività, consentendo il miglioramento globale delle condizioni di comfort dell'individuo.

La proposta sembra quindi potersi ben inserire nel panorama delle tecniche adattative e predittive per la valutazione, il raggiungimento e il mantenimento di un comfort soggettivo adattativo rispetto allo scenario, permettendo di realizzare nuove famiglie di modelli di comfort, che tengano in alto conto le caratteristiche del contesto e del profilo d'uso degli edifici e correlandole con le preferenze soggettive degli utenti.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Aicarr. *Newsletter n.30 - gennaio*. 2006 [cited 20-02-2007]; Available from: <http://www.aicarr.it/news/archivio/newsletter30.htm>.
2. K. Kolcaba and L. Wilson, Comfort Care: A Framework for Perianesthesia Nursing, *Journal of PeriAnesthesia Nursing*, Vol. 17(2), pp. 102-114, 2002.
3. K. Kolcaba, The art of comfort care, *J Nurs Scholars*, Vol. 27, pp. 287-289, 1995.
4. K. Kolcaba, *Comfort Theory and Practice: A Vision for Holistic Health Care and Research*, New York: Springer Publishing Co, 2003.
5. K. Kolcaba, The primary holisms in nursing, *J Adv Nurs*, Vol. 25, pp. 290-296, 1997.
6. K. Kolcaba, A taxonomic structure for the concept of comfort, *J Nurs Scholars*, Vol. 23, pp. 237-240, 1991.
7. L. Wilson and K. Kolcaba, Practical Application of Comfort Theory in the Perianesthesia Setting, *Journal of PeriAnesthesia Nursing*, Vol. 19(3), pp. 164-173, 2004.
8. K. Kolcaba and R. Kolcaba, An analysis of the concept of comfort, *J Adv Nurs* Vol. 16, pp. 1301-1310, 1991.
9. E. Fisher and K. Kolcaba, A holistic perspective on comfort care as an advance directive, *Crit Care Nurs Q*, Vol. 18, pp. 66-76, 1996.
10. ASHRAE, *Thermal environmental conditions for human occupancy*, ASHRAE, Editor. 2004, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.
11. P.O. Fanger, *Thermal Comfort*. 1970, Danish Technical Press: Copenhagen.
12. G.S. Brager and R.J. de Dear, Thermal adaptation in the built environment: a literature review, *Energy and Buildings*, Vol. 27(1), pp. 83-96, 1998.
13. R.P. Clark and O.G. Edholm, Man and His Thermal Environment, E. Arnold (ed.), 1985.
14. G.E. Folk, Climatic change and acclimatization, in *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*, K. Cena. and J.A. Clark (ed.), p. 157-168. Elsevier, Amsterdam, 1981
15. M. Nikolopoulou and K. Steemers, Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces, *Energy and Buildings*, Vol. 35(1), pp. 95-101, 2003.
16. J.F. Wohlwill, Behavioral response and adaptation to environmental stimulation, in *Physiological Anthropology*, A. Damon (ed.), p. 205-334. Harvard Univ. Press, Cambridge MA., 1975.
17. E. Sundstrom and M.G. Sundstrom, *Workplaces: the Psychology of the Physical Environment in Offices and Factories*, Cambridge University Press 1986.
18. N. Baker, M. Nikolopoulou, and K. Steemersin, Thermal comfort in urban spaces: different forms of adaptation Proc. REBUILD 1999 on Shaping Our Cities for the 21st Century, Barcelona, 1999.
19. *ISO 7730: Moderate thermal environments - determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. 1994, International Standards Organization: Geneva.
20. M.A. Humphreys and J.F. Nicol, The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments *Energy Buildings*, Vol. 34, pp. 667-684, 2002.
21. N. Baker and M. Standeven, *Renewable Energy*, Vol. 5(5-8), pp. 977-984, 1994.
22. N.V. Baker, Thermal comfort evaluation for passive cooling - A PASCOOL task, Proc. Conference on Solar Energy in Architecture and Planning, Florence: HS Stephens and Associates, 1993.
23. I.D. Griffiths, J.W. Huber, and A.P. Baillie, eds. The scope for energy conserving action: a comparison of the attitudinal and thermal comfort approaches, Behavioural and Social Science ed. NATO ASI series, Series D. Environmental Social Psychology, ed. D. Canter, et al., Vol. 45, pp. 46-56, Kluwer Academic Publ, Dordrecht, Netherlands, 1988.
24. S. Kaplan and R. Kaplan, *Cognition and Environment: Functioning in an Uncertain World*. 1982: Praeger, NY.
25. D.A. McIntyre, *Energy Buildings*, Vol. 5, pp. 89-96, 1982
26. N.A. Oseland, *Energy Buildings*, Vol. 21(1), pp. 15-54, 1994.
27. N.A. Oseland, *Energy Buildings*, Vol. 23, pp. 101-115, 1995.
28. M. Paciuk, The role of personal control of the environment in thermal comfort and satisfaction at the workplace. Coming of age, EDRA 21/1990, in *Environmental Design Research Association R.I. Selby, et al. (ed.)*, p. 303-312. Oklahoma City, OK, USA, 1990.
29. M. Wooldridge and N.R. Jennings, Intelligent agents: Theory and practice, *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 10(2), pp. 115-152, 1995.
30. A. Kobsa, Generic User Modeling Systems, *User Modeling and User-Adapted Interaction*, Vol. 11, pp. 49-63, 2001.
31. T. Magedanz, K. Rothermel, and S. Krause, *Intelligent Agents: An emerging technology for next generation telecommunication?*, in *Proc. of the International Conference on Computer Communication (INFOCOM'96)*. 1996, IEEE Press: San Francisco, California, USA. p. 464-472.

## **RECUPERO DI UNA CAVITA' NATURALE: INDAGINE PRELIMINARE SU ASPETTI MICROCLIMATICI E ILLUMINOTECNICI PROPOSTA DI SOLUZIONI ECOCOMPATIBILI**

C. Buratti<sup>1</sup>, P. Ricciardi<sup>2</sup>, M. Vergoni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CIRIAF, Sez. Fisica Tecnica e Inquinamento Ambientale, Università di Perugia, Via Duranti 67, 06125 Perugia

<sup>2</sup>CIRIAF, Sez. Inquinamento Acustico e da Emissioni Gassose, Università di Pavia, Via Ferrata 1, 27100 Pavia

### **SOMMARIO**

Lo studio del comfort termoigrometrico e illuminotecnico in ambienti moderati di tipo convenzionale è da tempo oggetto di studio e numerosi sono i lavori presenti in Letteratura. Oggetto del presente lavoro è la fase preliminare di studio per rendere abitabile una cavità naturale situata nel comune di Sacrofano, in provincia di Roma. Il progetto nasce da un'idea del proprietario della grotta che ha coinvolto diverse figure tra cui l'Università di Perugia, l'amministrazione locale ed alcune aziende che operano nel settore di impianti eco-compatibili ed energie rinnovabili.

E' stata condotta una campagna di rilievi con lo scopo di valutare le attuali condizioni dell'ambiente, indagando i principali parametri microclimatici, di qualità dell'aria ed illuminotecnici. In fase di post-processing, si sono calcolati gli indici PMV e PPD e confrontati i valori con gli standard previsti sia dalla UNI EN ISO 7730 che dalla ISO-DIS 7730. Per il comfort visivo, i valori di Illuminamento e Luminanza misurati sono stati messi in relazione con quelli prescritti dalla norma UNI EN12464.

E' stata condotta parallelamente una ricerca finalizzata ad individuare i prodotti offerti dal mercato per climatizzare ed illuminare la grotta in maniera eco-compatibile: particolare interesse è stato rivolto all'impiego dell'energia solare e delle biomasse. Sono stati ipotizzati, inoltre, alcuni interventi strutturali ed architettonici per adeguare la cavità agli standard abitativi minimi e creare i presupposti per l'alloggiamento di impianti tecnologici ad impatto ambientale ridotto.

### **INTRODUZIONE**

Il comfort in ambienti confinati ha coinvolto molteplici settori tecnico-scientifici che, con crescente enfasi, si sono sviluppati con il fine di rendere il più possibile gradevole la permanenza in ambienti confinati da parte degli occupanti. Gli aspetti microclimatici hanno avuto negli studi del fisico danese Fanger un impulso deciso e determinante nell'ispirare nuove normative e offrire spunti ai progettisti per migliorare le prestazioni degli impianti, ottimizzando anche le tecnologie disponibili. La presenza di luce poi, è uno dei fattori principali che influenzano l'abitabilità di un luogo chiuso: una buona illuminazione garantisce ai soggetti che si trovano ad occupare un ambiente, momentaneamente o in maniera stabile, un'elevata qualità della visione, cautelando la salute dell'organo della vista, offrendo una valorizzazione estetica dell'ambiente stesso, con conseguente benessere anche psicologico.

Molteplici sono gli studi presenti in Letteratura che trattano separatamente o congiuntamente il benessere termoigrometrico e illuminotecnico in luoghi quali residenze, uffici, scuole, attività commerciali: sono tutti spazi appositamente progettati e realizzati con destinazioni d'uso prestabilite e perciò subordinate a standard ormai consolidati.

Nel presente lavoro si espongono i risultati di uno studio preliminare indirizzato a recuperare e rendere vivibile una cavità naturale tufacea, per trasformarla in un ambiente salubre con l'impiego esclusivo di soluzioni architettoniche e tecnologiche eco-compatibili.

La cavità è situata nel comune di Sacrofano, in provincia di Roma: l'idea ha preso forma dalla volontà del proprietario di realizzare un ambiente pilota che funga da elemento trainante per sfruttare al meglio tali cavità, tipiche della zona, quasi sempre inutilizzate.

Il progetto ha coinvolto anche l'amministrazione comunale di Sacrofano e numerosi sono stati i contatti anche con operatori di mercato specializzati nella produzione di soluzioni impiantistiche eco-compatibili.

La cavità è stata dapprima studiata da altre figure professionali legate alla committenza, dal punto di vista architettonico, della stabilità strutturale e dei materiali.

Lo studio è articolato in una ricerca bibliografica mirata alle problematiche in esame, successivamente si è passati alla programmazione di una campagna di misure per valutare le attuali condizioni all'interno della grotta; l'elaborazione dei risultati ed il confronto con gli intervalli imposti dalle normative tecniche ha suggerito le prime indicazioni per intervenire sul sito, mediante alcune soluzioni impiantistiche ad impatto ambientale limitato, la cui progettazione preliminare costituisce il punto ultimo in questa fase del lavoro.

### **INQUADRAMENTO DEL SITO E LAYOUT DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE**

#### **La grotta di Sacrofano**

La grotta tufacea si trova all'interno del Parco Naturale Regionale di Veio, tra la Via Flaminia e la Via Cassia a nord di Roma; il territorio ha un andamento prevalentemente collinare (fig. 1), non vi sono rilievi accentuati e la gran parte delle alture derivano da crateri e depositi vulcanici. La grande valle di Sacrofano, infatti, è nata dalla depressione di piccole e grandi bocche crateriche e presenta pianure intervallate ad altopiani, gole e balze. Il tutto è stato creato dalla lenta erosione dei corsi d'acqua e dalla giovane stratificazione di rocce di tipo tufaceo.



Figura 1: il territorio di Sacrofano visibile dalla cavità naturale oggetto di studio.

Non è da sottovalutare l'aspetto storico - archeologico del sito, che ha rappresentato un centro di modesta importanza in diverse epoche. Gli edifici che dominano queste zone sono prevalentemente realizzati in tufo, un materiale povero che rappresenta ancora oggi la pietra locale più diffusa, grazie alla sua lavorabilità, creando dei blocchi di pietrame che, esposti all'aria, prendono maggior consistenza.

La cavità naturale si trova a circa 260 m su livello del mare, ha uno sviluppo prevalentemente longitudinale lungo l'asse sud-nord, con ingresso orientato a sud, che si affaccia su uno spazio aperto di circa 40 m<sup>2</sup>: tale superficie è delimitata dal muro di un'abitazione sul lato ovest, mentre ad est si apre lasciando spazio all'ingresso di un'altra grotta, di proprietà diversa.

E' possibile accedere alla cavità attraverso un cancello metallico sormontato da un arco e montato su una parete di blocchi di tufo che chiude l'apertura naturale della grotta, avanzando l'ingresso originario di circa un metro e mezzo.

All'interno della grotta si distinguono 5 zone: un piccolo ingresso (A), con pareti in blocchi di tufo; l'ambiente principale (B), il più ampio e maggiormente vivibile della grotta; un corridoio (C) sviluppato in lunghezza, per circa 8 metri, ma di larghezza variabile tra un minimo di circa 1,60 m e un massimo di 1,81 m, e due nicchie, una sulla parete est (D) di dimensioni maggiori, e una ad ovest (E) di dimensioni più contenute.

E' possibile, inoltre, osservare sulle pareti la presenza di piccole cavità, di varie dimensioni, tipiche della roccia tufacea, che vanno a costituire delle nicchie tondeggianti rialzate rispetto al pavimento e che probabilmente erano adibite a scaffali quando la grotta era utilizzata come cantina.

All'esterno, nella parte superiore all'ingresso della grotta, in posizione leggermente arretrata, si rileva la presenza di un'altra cavità di forma irregolare, con una superficie pari circa a 5 m<sup>2</sup> e altezza irregolare, mediamente pari a 1,80 m, che incide sulla volta della grotta principale.

### Strumentazione di misura e pianificazione del rilievo

Gli strumenti impiegati nei rilievi microclimatici sono stati: due multiacquisitori della linea BABUC e le relative sonde conformi a quanto prescritto dalla UNI EN ISO 7726, montate in differenti configurazioni.

In particolare, le sonde connesse alle centraline hanno permesso il rilievo delle principali grandezze riportate nella UNI EN ISO 7730 e nella ISO/DIS 7730 quali:

- temperatura dell'aria secca e umida;
- umidità relativa;
- velocità dell'aria;
- temperatura del globotermometro;
- pressione atmosferica;
- temperatura asimmetrica radiante;
- temperatura del pavimento;
- concentrazione di CO<sub>2</sub>.

Da tali valori, in automatico, o tramite software in post processing, lo strumento è in grado di determinare alcuni indici globali e locali di comfort:

- PMV;
- PPD;
- rischio da corrente d'aria;
- gradiente verticale di temperatura;
- percentuale di insoddisfatti da temperatura del pavimento.

Ai fini del rilievo illuminotecnica, si sono impiegati due strumenti della Konica Minolta, il luxmetro-colorimetro Chromameter CL-200 e il misuratore di Luminanza LS-100, in grado di misurare:

- illuminamento (lux);
- temperatura di colore (Kelvin);
- luminanza (cd/m<sup>2</sup>).

Mediante tali parametri è possibile valutare il comfort visivo secondo quanto previsto dalla UNI EN 12464.

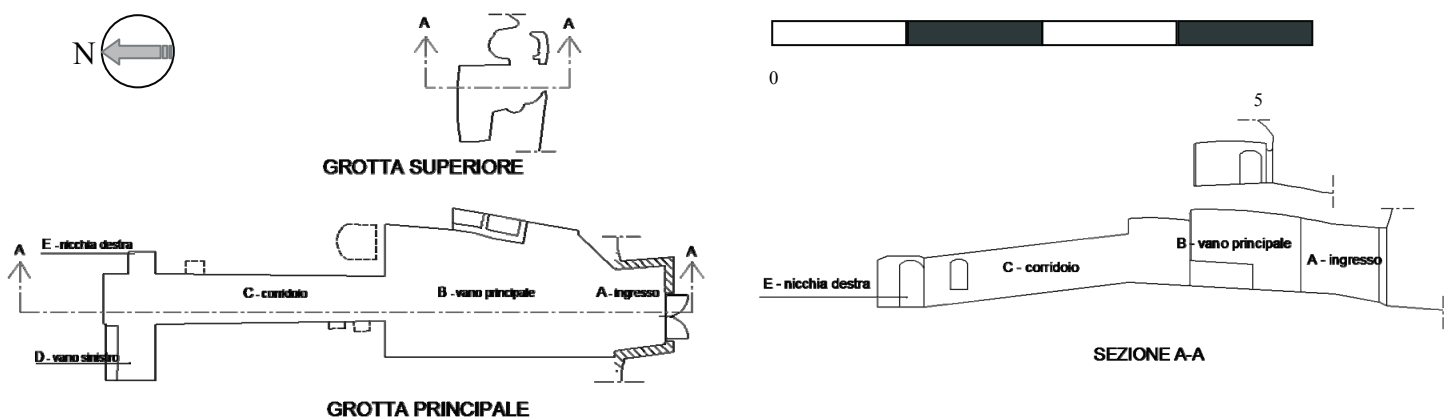


Figura 2: planimetria e sezione della cavità naturale.

Le misure sono state effettuate in una giornata dell'ottobre 2006 e consistono in un ciclo di misure mattutino e un pomeriggio.

In aggiunta, due termoigrometri a capelli sono stati posizionati rispettivamente nella grotta superiore (per rappresentare le condizioni esterne), e nell'ambiente principale all'interno della cavità: il rilievo ha avuto la durata di due settimane.

Per le due centraline BABUC sono state individuate 4 postazioni (fig. 3), una esterna e tre interne, così da relazionare i dati con la situazione meteorologica e climatica stagionale. Ciascun rilievo ha avuto la durata di 10 minuti in ogni posizione, con un intervallo di acquisizione pari a 20 secondi, per un totale di 30 valori istantanei.

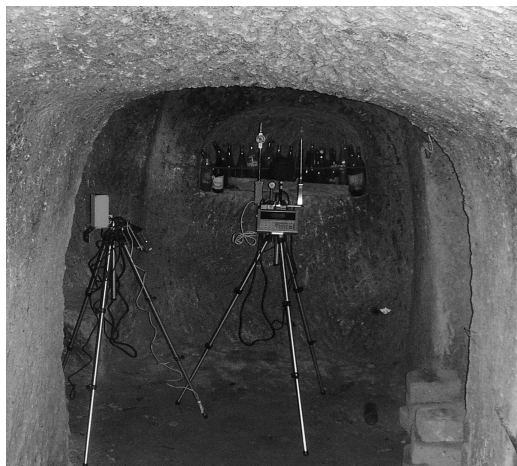


Figura 3: centraline microclimatiche posizionate al termine del corridoio, sul lato nord, della cavità in corrispondenza delle nicchie D e E.

Allo stato attuale, la grotta non è dotata di impianto di illuminazione artificiale: per le misure di illuminamento sono stati individuati 16 punti, uniformemente distribuiti su tutta la superficie della grotta. Non essendo ancora stati definiti i compiti visivi, ci si è limitati a verificare le zone di passaggio ipotetiche, posizionando lo strumento ad un'altezza di 20 cm da terra. Le misure di luminanza (fig. 4) hanno riguardato il solo contributo imputabile alla riflessione di alcune superfici: si sono scelti 5 punti in corrispondenza della porta d'ingresso, valutati da tre diverse posizioni, e altri 5 punti sulla parete interna, valutati in una sola posizione.



Figura 4: Luminanzometro in prossimità di una parete all'interna alla cavità.

## RISULTATI DEI RILIEVI DELLO STATO ATTUALE

### Comfort microclimatico

L'analisi dei risultati si è basata sul confronto dei valori ottenuti per ogni postazione; successivamente gli stessi sono stati mediati per ottenere una sintesi delle condizioni termoigrometriche della cavità durante la sessione del mattino e quelle del pomeriggio. Ai fini del calcolo degli indici microclimatici, è stato necessario effettuare delle ipotesi circa l'attività metabolica svolta dai soggetti e la resistenza termica dell'abbigliamento (Tab.1), con un'ipotesi di rendimento meccanico pari allo 0%.

Tabella 1: ipotesi sull'attività metabolica e resistenza termica del vestiario.

Attività metabolica	Riferimento
M = 1,33 met (77,5 W/m <sup>2</sup> ), occupazione impiegato	(UNI EN 28996)
M = 1,20 met (70 W/m <sup>2</sup> ), attività sedentaria	
Resistenza termica del vestiario	
Composizione tipica autunno (uomo) 1,03 clo	(UNI EN ISO 9920)
Composizione tipica autunno (donna) 0,92 clo	

In tabella 2 e 3 sono riportati i valori delle principali grandezze ambientali rispettivamente per le sessioni mattutina e pomeridiana. I dati delle postazioni 2 e 3, rappresentativi dell'ambiente principale, sono stati raggruppati dal momento che sono stati rilevati valori pressoché coincidenti.

Tabella 2: sintesi dei parametri microclimatici (mattino).

	t <sub>a</sub> (°C)	t <sub>u</sub> (°C)	UR (%)	CO <sub>2</sub> (ppm)	t <sub>g</sub> (°C)	P <sub>a</sub> (hPa)
Postazione 1 Esterno	21,82	17,18	61,76	474	-	978
Postazione 2/3	20,40	17,7	76,31	550	19,76	981
Postazione 4	17,92	16,85	89,73	663	17,10	982

Tabella 3: sintesi dei parametri microclimatici (pomeriggio).

	t <sub>a</sub> (°C)	t <sub>u</sub> (°C)	UR (%)	CO <sub>2</sub> (ppm)	t <sub>g</sub> (°C)	P <sub>a</sub> (hPa)
Postazione 1 Esterno	22,59	17,91	62,6	510	-	982
Postazione 2/3	20,5	17,72	75,77	621	19,18	981
Postazione 4	17,64	16,82	92,04	708	17,15	982

Si osserva che l'umidità relativa è estremamente elevata, soprattutto in fondo alla cavità, con valori (punte oltre il 90%) che ricadono al di fuori degli intervalli imposti dalle norme.

La temperatura secca diminuisce notevolmente passando dalla postazione 1 alla 4, sia di mattina che di pomeriggio: c'è una differenza di 3,9 °C tra l'esterno e il fondo della grotta durante la mattina, mentre di pomeriggio l'escursione raggiunge i 5 °C.

La temperatura a bulbo umido, invece, si mantiene costante nelle tre diverse postazioni: l'escursione tra la posizione 2 e la 4 è sempre inferiore a 1 °C.

La differenza di umidità relativa tra l'esterno e il lato nord della grotta è di circa il 28% nel ciclo di misura mattutino, 30% in quello pomeridiano. La massima escursione termica tra la temperatura interna e quella esterna è di 2 °C di mattina e diventa di oltre 4 °C nel pomeriggio.

I valori di temperatura esterna misurati non sono in linea

con i dati storico-statistici che si riscontrano usualmente in questo periodo, in quanto risultano ben al di sopra delle medie stagionali, soprattutto nelle ore più calde della giornata.

Passando all'analisi degli indici globali, in postazione 2 e 3 (Tab. 4), i valori PMV poco si discostano dalla neutralità termica, con una PPD attorno al 5% sia nel ciclo di misura mattutino che in quello pomeridiano.

Nella postazione 4, la PPD tende ad aumentare fino ad oltre il 15% nelle ore pomeridiane, a causa dell'umidità relativa particolarmente elevata e di temperature al di sotto di 18°C.

Tabella 4: valori medi degli indici PMV e PPD all'interno della cavità.

Postazione	2 e 3		4	
Indice	PMV	PPD (%)	PMV	PPD (%)
Mattina	-0,16	5,54	-0,58	12,04
Pomeriggio	-0,24	6,29	-0,70	15,42

Relativamente al discomfort locale, si è ottenuta una PPD superiore al 5% per il gradiente di temperatura verticale nel ciclo di misure mattutino per le posizioni 2 e 3 (Fig. 5); in posizione 4, invece, tale indice si mantiene sempre al di sotto del 2%. Sempre nelle posizioni 2 e 3 è rilevante la percentuale di insoddisfatti da temperatura del pavimento, pari al 10,2% e 11,3% rispettivamente di mattina e di pomeriggio, in corrispondenza di una temperatura superficiale di circa 18°C (Fig. 6).

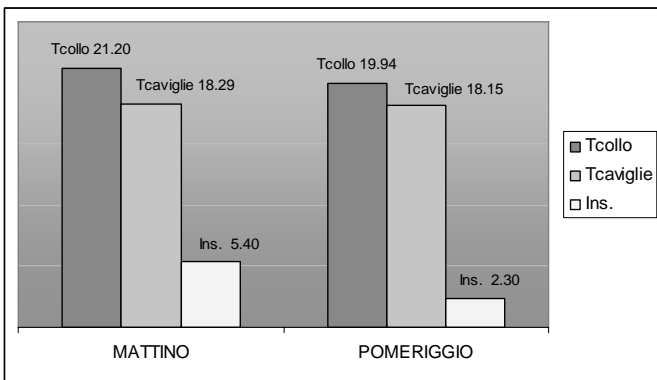


Figura 5: valori medi postazione 2 e 3 - Gradiente termico verticale e Percentuale Prevista di insoddisfatti.

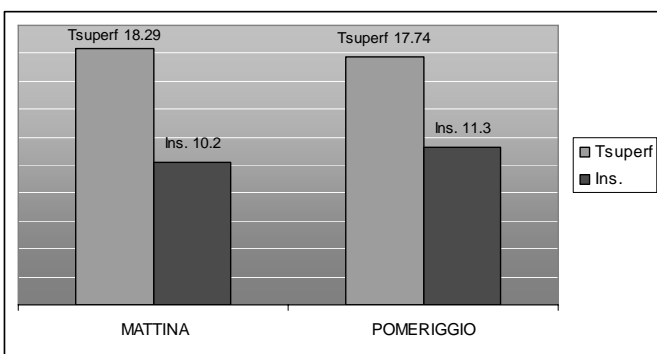


Figura 6: valori medi postazione 2 e 3 - Temperatura del pavimento e Percentuale Prevista di Insoddisfatti.

In postazione 4, la differenza di temperatura verticale è sempre al di sotto dei 3°C raccomandati dalla normativa, e la percentuale di insoddisfatti è sempre inferiore al 2% (Fig. 7)

La temperatura del pavimento (Fig. 8) è pari a 16,95°C e 17,40°C rispettivamente di mattina e di pomeriggio, e per questo la percentuale di insoddisfatti è vicina al 15% (13,9% e 12,5% rispettivamente).

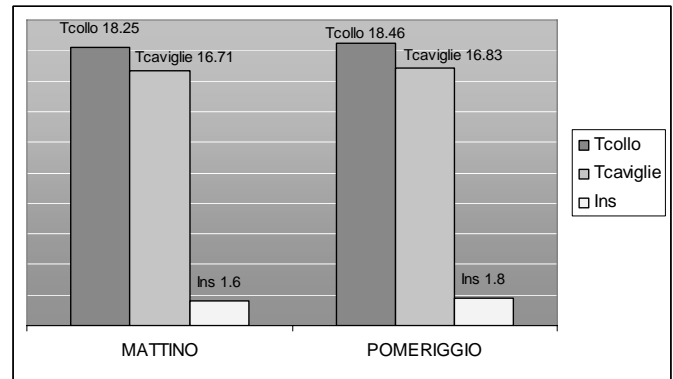


Figura 7: valori medi postazione 4 - Gradiente termico verticale e percentuale di insoddisfatti.

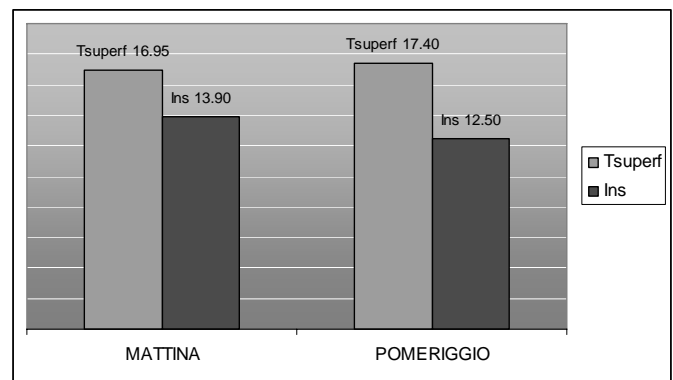


Figura 8: valori medi postazione 4 - Temperatura del pavimento e percentuale di insoddisfatti.

E' da sottolineare come, in ogni momento della giornata, siano nulli i valori del rischio da corrente d'aria: questo fatto è rappresentativo di velocità dell'aria e di intensità di turbolenza prossime allo zero in ogni ambiente della grotta, soprattutto nella parte più lontana dall'ingresso.

Per quel che riguarda la qualità dell'aria, misurata valutando la concentrazione di anidride carbonica, in postazione 2 e 3 la percentuale di insoddisfatti assume valori molto bassi, attorno al 2-3%; valori più elevati (6%), ma comunque contenuti negli standard qualitativi richiesti si hanno in fondo alla cavità.

### Comfort illuminotecnico

Nella parte della cavità più lontana dalla porta d'ingresso (punti 1-6), il contributo della luce naturale è molto scarso, con valori inferiori a 5 lux (Tab. 5). Per quanto riguarda la parte restante, nelle ore mattutine si registra un andamento dei valori di illuminamento generalmente crescente man mano che ci si avvicina alla porta d'ingresso, passando dai 9 lux del punto 7 ai 6669 lux del punto 16, con alcune eccezioni causate

dalla presenza di oggetti d'ingombro all'interno della grotta e di rami di alberi, all'esterno, che muovendosi schermano la luce diretta del sole, come succede ad esempio nei punti 10 e 14, nei quali si ha un abbassamento rispetto ai punti precedenti rispettivamente da 14 a 10 lux e da 112 a 93 lux.

Analoghi risultati si hanno nelle ore pomeridiane, nelle quali, però, l'illuminamento assume valori generalmente più bassi, ad eccezione di alcuni punti (come ad esempio il 12, 14 e 15) che nel pomeriggio sono interessati da raggi solari diretti, grazie all'abbassamento del sole e che, quindi, presentano un innalzamento dell'illuminamento rispetto al valore mattutino da 50 a 56 lux per il punto 12, da 93 a 116 lux per il punto 14 e da 267 a 418 lux per il punto 15.

In figura 9 sono riportate le curve isolux durante la giornata di rilievo.

Tabella 5: valori di illuminamento all'interno della cavità

ILLUMINAMENTO		
Punto	Mattina	Pomeriggio
1	≤ 5	≤ 5
2	≤ 5	≤ 5
3	≤ 5	≤ 5
4	≤ 5	≤ 5
5	≤ 5	≤ 5
6	≤ 5	≤ 5
7	9	9
8	14	5
9	14	7
10	10	1
11	35	23
12	50	56
13	112	109
14	93	116
15	267	418
16	6669	3048

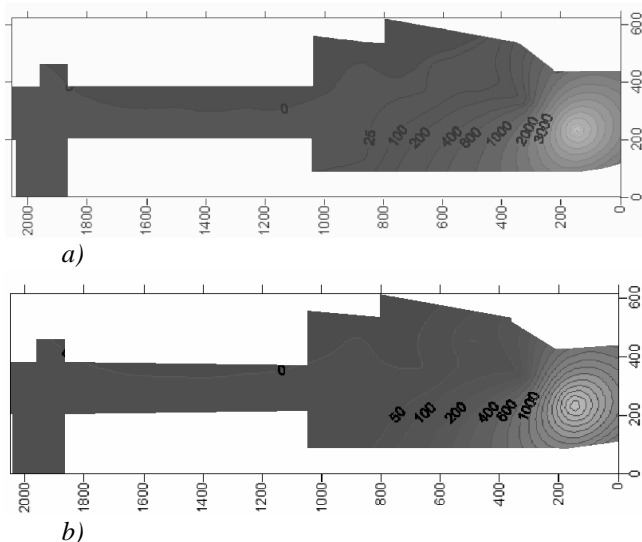


Figura 9: planimetria della cavità - Curve Isolux (mattina (a) pomeriggio(b))

Le misure di luminanza sono state effettuate su vari punti della porta di ingresso (unica sorgente di luce naturale), da tre diverse distanze dalla stessa, e sulla parete interna parallela all'ingresso.

Sono stati scelti i punti più significativi, tenendo conto della presenza dell'arco sovrastante che, nonostante le ridotte dimensioni, aumenta notevolmente l'apporto di luce all'interno della grotta.

Dai dati in tabella 6, si osserva come i valori di luminanza risultino strettamente correlati alla posizione relativa tra le postazioni di misura e il percorso compiuto dal sole rispetto all'orientamento dell'ingresso della cavità.

Il punto A, all'apice dell'arco, è l'unico ad essere irradiato direttamente dalla luce solare: nella postazione di misura si osservano valori costanti, nelle altre due posizioni si hanno valori più elevati nelle ore mattutine rispetto a quelle pomeridiane, con un picco di 4115 cd/m<sup>2</sup> misurato alla distanza di 5,5 m; la luminanza minore 152 cd/m<sup>2</sup>, si registra a 10,20 m.

La luminanza del punto B nelle ore pomeridiane alla distanza di 2,50 m dalla porta d'ingresso è risultata la più elevata con un valore di 7372 cd/m<sup>2</sup>, nettamente superiore a tutti gli altri misurati e determinato dalla posizione particolarmente favorevole della postazione di misura rispetto alla luce naturale filtrante dall'esterno. I valori mediamente più bassi sono stati misurati nei punti C e D che, trovandosi ai lati della porta, ricevono minore luce diretta a causa delle pareti degli edifici vicini e delle ante del cancello.

Nel punto E infine, si sono misurati valori costanti nella sessione mattutina mentre nel pomeriggio, nel punto più prossimo all'ingresso, il valore è risultato più basso rispetto a quello ottenuto per gli altri due, differenza spiegabile con l'ombra portata da una struttura limitrofa posta a destra del varco d'ingresso. Si riportano le curve di livello per visualizzare la luminanza sulla porta d'ingresso (Fig. 10) per la distanza intermedia di 5,50 m.

Tabella 6: valori della Luminanza sulla porta d'ingresso.

	Distanza Ingresso (verso l'interno)	2,50 m	5,50 m	10,20 m
	<b>Punto A</b>	Mattina	1021	4115
	Pomeriggio	1057	1801	152
<b>Punto B</b>	Mattina	1436	679	379
	Pomeriggio	7372	614	103
<b>Punto C</b>	Mattina	210	272	299
	Pomeriggio	392	1151	549
<b>Punto D</b>	Mattina	330	298	884
	Pomeriggio	147	256	348
<b>Punto E</b>	Mattina	1365	1346	1201
	Pomeriggio	745	1599	1515

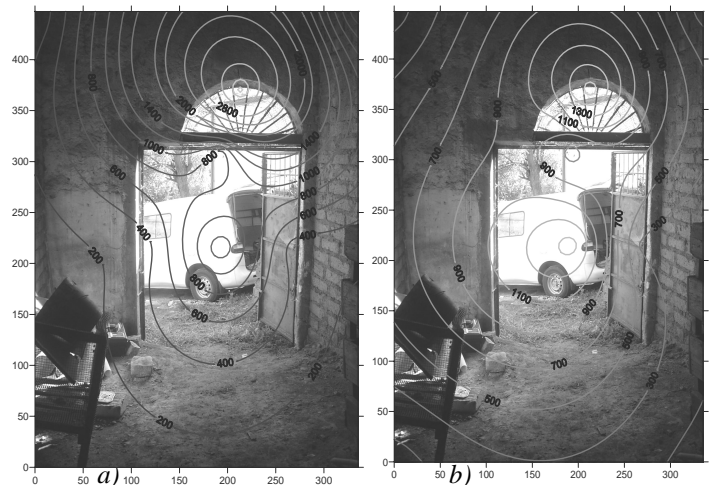


Figura 10: curve di livello della luminanza sulla porta d'ingresso (mattina (a) pomeriggio(b))

## IPOTESI DI PROGETTO PRELIMINARE

### Interventi strutturali ed architettonici

L'intervento mira a mantenere gli ambienti presenti senza separarli o crearne di nuovi, realizzando, però, alcune operazioni di modellamento e ampliamento, dopo aver effettuato opportune verifiche di consolidamento statico e strutturale. In particolare:

1. ampliamento dell'attuale ingresso e consolidamento della volta dove oggi sono presenti travi in acciaio;
2. pulizia del piano di calpestio da terra e materiale inerte e livellamento della pavimentazione;
3. realizzazione di una pavimentazione in pietra naturale sopraelevata, con opportuna impermeabilizzazione;
4. rimozione dei muretti in blocchi di tufo presenti sul lato ovest della grotta e pulizia della vasca che può fungere da serbatoio di acqua;
5. livellamento del piano di calpestio del corridoio che, attualmente, ha una pendenza di circa il 10 %;
6. ampliamento delle dimensioni del vano sinistro;
7. ampliamento della nicchia destra creando, così, due ambienti simmetrici e speculari;
8. ampliamento dell'ingresso e sostituzione parziale della muratura con materiali trasparenti.

### Soluzioni per il comfort microclimatico

Per dotare la grotta di impianti ecocompatibili, le soluzioni individuate sono da ricercare nell'impiego di energia solare, termica e fotovoltaica integrata, per la parte termica, con energia da biomasse.

Si ipotizza la realizzazione di un impianto a pavimento al di sotto della pavimentazione rialzata. Il riscaldamento del fluido termovettore è ottenibile installando una serie di pannelli solari piani ai fianchi della cavità superiore, a ridosso del pendio. Una possibile disposizione delle tubazioni, può assumere la configurazione di figura 11, con interasse 20 cm, temperatura del fluido 30°C circa.

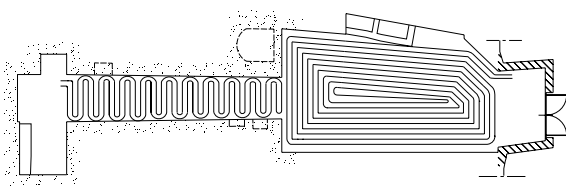


Figura 11: disposizione delle tubazioni per il riscaldamento a pavimento

Come integrazione al sistema solare termico, si prevede l'inserimento di una caldaia funzionante a biomasse, che per facilità di stoccaggio e rendimento di combustione può essere alimentata a pellet.

Un problema, da non sottovalutare è costituito dalle emissioni di radon: questo gas, estremamente pesante, tende ad accumularsi e, poiché la pressione all'interno di un ambiente è leggermente più bassa di quella esterna, l'aria tende a stagnare piuttosto che a rinnovarsi. Un metodo immediato per evitare l'accumulo di questo gas è l'aerazione degli ambienti, soprattutto nei casi in cui questi siano interrati o a contatto diretto con il terreno, come nel caso in esame.

Una corretta e continua ventilazione può contrastare l'aumento della concentrazione di radon; questa tecnica risulta

spesso, però, insufficiente o inefficace e, specialmente nei mesi invernali, dispendiosa in termini di riscaldamento dei locali.

La pavimentazione rialzata, inoltre, garantisce l'annullamento delle radiazioni di radon dal pavimento nell'ambiente.

Infine, si pensa di dotare la cavità di sistemi specifici per eliminare l'umidità che risale per capillarità nei muri, al fine di migliorare le condizioni di vita e ridurre i costi di riscaldamento.

### Ipotesi per il comfort illuminotecnico

Le ipotesi correttive consistono in primo luogo nell'integrazione di sistemi di captazione e trasporto della luce naturale all'interno della grotta con un impianto di illuminazione artificiale.

Il mercato offre molteplici sistemi per la captazione della luce naturale:

- lucernari: servono per condurre la luce all'interno dell'edificio attraverso il tetto;
- tubi di luce: sono condotti verticali o orizzontali, con pareti interne ad alta riflessione, che trasmettono la luce dall'esterno all'interno;
- light pipes: simili ai tubi luce, sono costituiti da una serie di specchi collegati ad un eliostato;
- sistemi fotovoltaici;
- fibre ottiche: sistemi di lenti di Fresnel che filtrano la luce solare captata da un eliostato.

In particolare, si sono rivelati interessanti i *Captatori Solari* dell'azienda *BRIXIA SOLAR* (Fig. 12). Sono piccoli congegni emisferici, caratterizzati da un sistema di captazione ottica: sono costituiti da un captatore posto all'interno della calotta emisferica all'estremità, che direziona la luce solare e la incanala in un condotto ad alta riflessione, che può seguire percorsi obliqui, orizzontali, trasportando la luce nell'ambiente desiderato, dove un diffusore, applicato all'altezza del soffitto, la diffonde all'interno dell'ambiente. E' presente anche un sistema di ricambio d'aria.

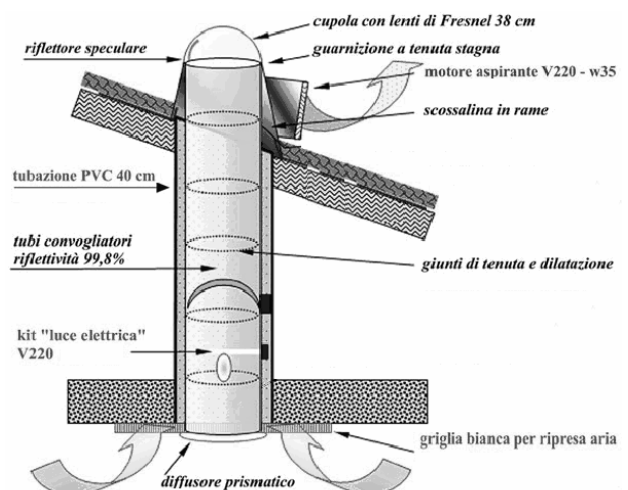


Figura 12: captatori solari Brixia Solar – Schema costruttivo

Per la grotta in esame il diametro individuato è di 520 mm, che può illuminare superfici tra 25 e 36 m<sup>2</sup>, con un flusso luminoso pari a 15000 lumen. Nel posizionamento, occorre tener conto che la luce in uscita dal condotto dipende

fortemente dall'intensità luminosa del sole e diminuisce in relazione alla lunghezza del condotto, per cui è consigliabile posizionare il captatore sulla copertura della grotta, alternandolo con i pannelli solari necessari al riscaldamento, ma arretrato il più possibile rispetto all'ingresso, in modo tale da raggiungere facilmente il fondo della grotta con un condotto più breve possibile. E' inoltre possibile captare una maggiore radiazione luminosa, senza variare la posizione, elevando i captatori mediante Torrette Solari in rame.

Considerata la superficie della grotta, di circa 65 m<sup>2</sup>, e per garantire un valore puntuale dell'illuminamento di almeno 100 lux è necessario un flusso luminoso totale di circa 6550 lm. La scelta percorribile è quella di lampade ad alogeni per tensione di rete ad attacco doppio, che soddisfano i requisiti flusso, temperatura di colore, durata e risparmio energetico: si prevede l'impiego di 9 lampade con 50 W di potenza ciascuna, adeguatamente distribuite (Fig. 13).

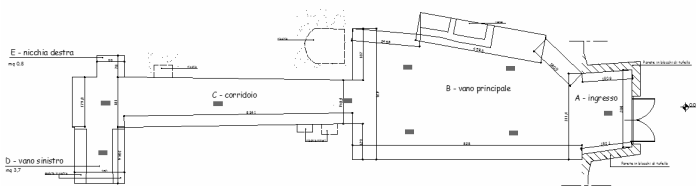


Figura 13: ipotesi di posizionamento delle lampade.

## CONCLUSIONI

In Letteratura esistono molteplici studi volti all'indagine delle condizioni di benessere per gli occupanti di ambienti moderati convenzionali, progettati e realizzati per garantire qualità ottimali in spazi confinati.

Il presente studio ha come oggetto la valutazione delle condizioni termoisometriche ed illuminotecniche all'interno di una cavità naturale per rendere la stessa abitabile e rispondente alle esigenze di comfort. Il progetto nasce da un'idea del proprietario della grotta che ha coinvolto diverse figure tra cui l'Università di Perugia, l'amministrazione locale ed alcune aziende che operano nel settore di impianti eco-compatibili ed energie rinnovabili.

Il lavoro ha portato alla definizione del comfort termoisometrico e illuminotecnico all'interno di una cavità naturale situata nel territorio di Sacrofano in provincia di Roma. Attraverso una campagna di misure è stata valutata la possibilità di recuperare la grotta tufacea, oggi in disuso, per trasformarla in un ambiente vivibile impiegando esclusivamente soluzioni a ridotto impatto ambientale.

Dal punto di vista microclimatico, in linea generale si può affermare che la cavità, nonostante sia distante dall'idea classica di luogo confortevole e sia attualmente allo stato di abbandono, non offre uno standard qualitativo eccessivamente inferiore a quelli previsti dalla normativa tecnica. I risultati sono stati comunque ottenuti in una giornata con condizioni esterne favorevoli e dunque, per avere un quadro più rappresentativo, occorrerebbe monitorare i parametri con maggiore continuità.

I punti di misura individuati all'interno della cavità sono l'ambiente principale (postazione 2 e postazione 3) e il lato nord della cavità: in fondo alla grotta (postazione 4).

All'interno dell'ambiente principale non si sono riscontrati particolari valori fuori norma; tuttavia, si sono evidenziati tre

aspetti su cui è opportuno soffermarsi:

- l'umidità relativa riscontrata risulta costantemente superiore al 70% (in media è pari al 76%);
- il gradiente verticale di temperatura riscontrato raggiunge il limite di 3°C, con una PPD che supera il 5%;
- facendo una media tra le temperature del pavimento, rilevate nel ciclo di misura mattutino e in quello pomeridiano, si riscontra una temperatura media superficiale di 18°C, a cui corrisponde una percentuale prevista di insoddisfatti media di 11%.

E' importante notare che, mentre il problema legato all'eccessiva umidità dell'aria è riscontrato in ognuna delle due postazioni individuate all'interno della grotta, l'elevato gradiente di temperatura verticale costituisce un evento singolare, che non si è ripetuto in corrispondenza del lato nord della cavità, dove si ha una differenza di temperatura media di 1,5 - 1,6°C. Particolare attenzione va posta alla temperatura del pavimento, che è in media pari a 18°C, a causa dell'elevata umidità del suolo, e ricade al di fuori dell'intervallo imposto dalla normativa (19-26°C): gli insoddisfatti da temperatura superficiale, quindi, superano sempre il 10%. Per quel che riguarda la qualità dell'aria, non si sono riscontrate percentuali di insoddisfatti da concentrazione di anidride carbonica superiori al 20%, inoltre non si hanno insoddisfatti da asimmetria radiante e anche il draft risk (DR) è costantemente nullo.

In fondo alla grotta, sia di mattina che di pomeriggio, le percentuali di insoddisfatti aumentano notevolmente per l'elevato grado di umidità, lo scarso irraggiamento solare e il non adeguato ricambio d'aria. Infatti, sono state rilevate le seguenti problematiche:

- l'umidità relativa media è pari al 91%;
- gli insoddisfatti da temperatura del pavimento sono in media pari al 13,2%, la temperatura superficiale è pari a 17°C;
- la temperatura dell'aria è pari, in media, a 17,5°C.

Si sono ipotizzate soluzioni tecnologiche ed architettoniche; i criteri fondamentali su cui si è basato il progetto sono la razionalizzazione dell'assetto distributivo, l'ottimizzazione della struttura e del sistema tecnologico e l'applicazione di soluzioni eco-sostenibili alternative. Le risorse energetiche impiegabili sono l'energia solare e la bioenergia derivante dalle biomasse. Una progettazione più accurata degli interventi necessita di un'estensione del rilievo a periodi in cui si hanno le condizioni esterne più gravose (pieno inverno e pieno estate).

In merito ai rilievi illuminotecnici, le misure di illuminamento hanno interessato 16 punti dislocati su tutta la superficie della cavità, mentre la luminanza è stata misurata in 5 punti sulla porta d'ingresso (unica fonte luminosa naturale per l'ambiente), da tre diverse distanze, in modo da variare l'angolazione con cui la luce solare entra nella cavità, e sulla parete interna.

Dall'analisi dei dati è emerso che, per quanto riguarda l'illuminamento, si riscontrano valori sostanzialmente crescenti a partire dai punti sul fondo della grotta fino a quelli più vicini all'ingresso, con alcune eccezioni causate dalla presenza di ingombri non rimovibili. Si è osservato che, dal fondo alla fine del corridoio che porta alla sala principale, l'illuminamento assume valori inferiori a 5 lux, quindi quasi trascurabili e molto inferiori rispetto agli oltre 6500 lux misurati di fronte all'ingresso. Si sono misurati valori di illuminamento più elevati la mattina rispetto al pomeriggio in quasi tutti i punti, per il fatto che l'ingresso della cavità è esposto a sud.

Per quanto riguarda, invece, la luminanza sulla porta d'ingresso, si sono riscontrati valori diversi sui medesimi punti, dalle tre diverse distanze (2,5; 5,5; 10,2 m) in stretta correlazione con il percorso del sole sulla linea di orizzonte e dall'orientamento dell'ingresso della cavità. Nei punti laterali si sono misurati valori più bassi dal momento che non sono colpiti da luce diretta e parzialmente schermati dagli edifici confinanti e dalle ante del cancello.

I valori della luminanza sulla parete interna, invece, si sono rivelati bassi, assumendo anche valori prossimi allo zero, poiché non è presente alcuna superficie riflettente o sorgente luminosa in quella direzione.

Dai dati emersi dalla campagna di misura in sito, si è riscontrata la necessità di proporre delle soluzioni per ovviare all'evidente scarsità di luce naturale, soprattutto nelle zone più interne della cavità, non solo mediante un impianto di illuminazione artificiale, ma anche con sistemi di captazione della luce naturale da sfruttare nelle ore diurne, consentendo un notevole risparmio energetico. Oltre al contributo dei sistemi solari fotovoltaici, che potrebbero alimentare un sistema di 9 lampade ad alogeni, si è studiato l'inserimento nel contesto di captatori solari capaci di convogliare all'interno la luce naturale incidente su dispositivi a torretta.

## NOMENCLATURA

CO<sub>2</sub> = concentrazione di anidride carbonica (ppm);  
 Ins. = insoddisfatti a causa di discomfort locale (%);  
 Pa = pressione atmosferica (hPa);  
 PMV = voto medio previsto;  
 PPD = percentuale prevista di insoddisfatti (%);  
 T = temperatura (°C);  
 UR = umidità relativa (%).

### Pedici:

a = aria secca;  
 g = globotermometro  
 u = aria umida.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- FELLI M., Lezioni di Fisica Tecnica 1, Termodinamica, Macchine, Impianti, Nuova edizione a cura di Francesco Ascdrubali, Morlacchi Editore, Perugia, Maggio 2004.
- FELLI M., Lezioni di Fisica Tecnica 2, Trasmissione del calore, Acustica, Tecnica dell'illuminazione, Nuova edizione a cura di Cinzia Buratti, Morlacchi Editore, Perugia, Ottobre 2004.
- FANGER P.O., Thermal comfort, McGraw Hill, New York, 1970.
- MONCADA LO GIUDICE G., COPPI M., Benessere termico e qualità dell'aria interna. Roma: Masson. 1997.
- ALFANO G., D'AMBROSIO F.R., RICCIO G., La valutazione delle condizioni termoisometriche negli ambienti di lavoro: comfort e sicurezza. Napoli: CUEN. 1997.
- ASHRAE. Physiological principles, comfort and health. In: ASHRAE Fundamentals, capitolo 8. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2001.
- MONCADA LO GIUDICE G., Principi di illuminotecnica, PEG, Milano, 1975
- AGHEMO C., LO VERSO V., Guida alla progettazione dell'illuminazione naturale, AIDI 2003
- BONOMO M. e BUCCIANTI R., Guida Tecnica per l'Illuminazione degli Interni
- BARDUCCI I., Fotometria e Colorimetria, ESA, Roma 1982
- FELLIN L. e FORCOLINI G. e PALLADINO P., Manuale di Illuminotecnica, Tecniche Nuove, Settimo Milanese (MI), 1999
- ISO, 2003. Ergonomics of thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort. ISO/DIS 7730. Geneva: International Standardization Organization, 2003.
- UNI-EN-ISO 10551- Ergonomia degli ambienti termici -Valutazione dell'influenza dell'ambiente termico mediante scale di giudizio soggettive. Gennaio 2002.
- ASHRAE, 2004. "Thermal Environment Conditions for Human Occupancy - ASHRAE Standard 55/2004". Geneva, 2003.
- UNI, "Ergonomia - Determinazione della produzione di energia termica metabolica", Norma UNI-EN 28996, Unificazione Italiana, Milano, 1995.
- UNI, "Ambienti termici - Strumenti e metodi per la misura delle grandezze fisiche", Norma UNI-EN 27726, Unificazione Italiana, Milano, 1996.
- UNI-EN-ISO 9920 - Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativi dell'abbigliamento. Marzo 2004.
- ASHRAE Standard 62.1/2004 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
- Standard ASTM 6245-98, Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations of Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, May 1998.
- UNI 10380, Illuminotecnica. Illuminazione di interni con luce artificiale, 1994
- UNI 10380/A1, Illuminotecnica. Illuminazione di interni, 1999
- UNI EN 12464-1, Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro interni, 2004

## INDICI PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA NEGLI AMBIENTI CIVILI CONFINATI

NICOLETTI Giovanni, ALITTO Gabriele, ANILE Francesco.

Università della Calabria - Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Meccanica  
Via Ponte Pietro Bucci - 87030 Arcavacata di Rende (CS)  
Telefono: 0984-494610, Fax: 0984-494673  
e-mail: [g.nicoletti@unical.it](mailto:g.nicoletti@unical.it), [g.alitto@tin.it](mailto:g.alitto@tin.it) e [francesco.anile@unical.it](mailto:francesco.anile@unical.it)

### SOMMARIO

La qualità dell'aria all'interno di ambienti confinati e, più propriamente all'interno di edifici, assume un significato estremamente importante per il benessere e la salute dell'uomo che quotidianamente occupa tali spazi.

Nella nota sono dapprima evidenziate e discusse, secondo una precisa suddivisione, le principali fonti di inquinamento presenti nell'aria indoor: sostanze chimiche, combustioni libere, radiazioni ionizzanti e non.

Quindi si propone, per ogni fonte di inquinamento, un indice, variabile tra 0 ed 1, che quantifichi il relativo impatto sulla purezza ed salubrità dell'aria circolante all'interno degli ambienti chiusi considerati.

Infine, si definisce, come strumento utile al tecnico ed al cittadino, un indice complessivo per valutare, con semplicità ed immediatezza, la qualità dell'aria negli ambienti confinati.

### 1. PREMESSE E GENERALITÀ

La qualità dell'aria negli ambienti confinati (IAQ = Indoor Air Quality) e, più propriamente, all'interno degli edifici, dipende da tutta una serie di fonti inquinanti di natura fisica, chimica e biologica ivi presenti.

Esse possono così essere correlate:

- a) all'inquinamento di sostanze chimiche presenti nell'aria indoor;
- b) alle combustioni libere attive negli ambienti interni;
- c) alla presenza di radiazioni ionizzanti e non nell'aria di che trattasi.

Il primo tipo risulta chiaramente influenzato dall'emissione interna di contaminanti chimici nonché da quelli provenienti dall'esterno.

Gli inquinanti chimici presenti all'esterno sono numerosi e le loro concentrazioni variano in modo molto marcato a seconda della zona considerata.

Per l'interno, invece, tutte le sorgenti di inquinamento possono significativamente ricondursi:

- agli occupanti ed alle attività da loro svolte;
- ai materiali compresi gli arredi, alle tappezzerie, ai prodotti detergenti e per le pulizie ed ai materiali da costruzione;
- ai sistemi impiantistici ed agli elettrodomestici;
- agli animali domestici ed ai parassiti.

Questi inquinanti interni, di cui esistono documentati effetti patologici più o meno gravi a seconda delle concentrazioni,

sono sommariamente identificati nei seguenti composti chimici ad agenti fisici:

- biossido di zolfo;
- ossidi di azoto;
- ossido di carbonio;
- formaldeide e composti organici volatili (COV);
- ozono;
- fumo;
- fibre;
- particolato;
- radon;
- radiazioni elettromagnetiche;
- contaminanti biologici.

Le sorgenti e le tipiche concentrazioni dei più importanti inquinanti presenti negli ambienti confinati, ad eccezione delle radiazioni elettromagnetiche, vengono riportate in modo esemplificativo nella **Tabella 1** dove sono anche indicati i rapporti tipici tra interno ed esterno.

Da questo quadro appare utile mettere a punto una valida metodologia di valutazione immediata della qualità dell'aria all'interno di ambienti confinati, quantificandone l'entità con la definizione di opportuni stimatori.

Pertanto, nel presente lavoro viene proposta una nuova procedura quantitativa che valuti l'impatto ambientale indoor degli inquinanti fisici e chimici su richiamati fornendo di fatto, mediante la predisposizione di alcuni indici adimensionali di merito, una misura della salubrità dell'aria circolante negli ambienti in oggetto.

Tali indici, per come definiti, rappresentano non solo un semplice strumento di controllo ambientale della qualità

dell'aria indoor, ma anche un riferimento certo di analisi ambientale sia per il cittadino che per il tecnico ed il legislatore.

**Tabella 1:** Le concentrazioni standard dei principali inquinanti interni

Inquinante	Sorgente	Concentrazione	Rapporto interno/esterno
monossido di carbonio	combustione, motori	100 mg/kg	>> 1
particelle respirabili	sigarette, aerosol, cucine	100-500 µg/m <sup>3</sup>	>> 1
vapori organici	combustione, solventi, aerosol	NA	> 1
biossido di azoto	sigarette, motori, combustione	200-1000 µg/m <sup>3</sup>	>> 1
biossido di zolfo	riscaldamento	20 µg/m <sup>3</sup>	< 1
particelle in sospensione (senza fumatori)	combustione, riscaldamento	100 µg/m <sup>3</sup>	1
solforati	fiammiferi	5 µg/m <sup>3</sup>	< 1
formaldeide	isolamenti, prodotti	0,05-1 mg/m <sup>3</sup>	> 1
radon	materiali, terreno, acque sotterranee	0,2-5 Bq/m <sup>3</sup>	>> 1
asbesto	protezione incendio	< 1000000 fibre/m <sup>3</sup>	1
fibre sintetiche	prodotti, vestiti, parati	NA	-
biossido di carbonio	attività umane, combustione, animali	3000 mg/m <sup>3</sup>	>> 1
organismi viventi	attività umane, piante, funghi, HVAC	NA	> 1
ozono	archi elettrici, sorgenti UV	20-200 µg/kg	> 1

Nella parte finale, l'articolo, partendo da questi indici di inquinamento, rappresenta la qualità dell'aria interna con un indice complessivo adimensionale IAQ di rilevante interesse applicativo per le bonifiche ed il controllo dell'aria all'interno di edifici civili e non.

## 2. L'INQUINAMENTO INDOOR DA SOSTANZE CHIMICHE

Le sostanze chimiche presenti nell'ambiente interno provocano un inquinamento che può essere quantificato per ogni contaminante attraverso la definizione del seguente indice:

$$i_i = \frac{2x_{ai} - x_{mi}}{2x_{ai}}$$

dove:

- $i_i$  = (pedice) 1, 2, ...n = generico contaminante;
- $x_{ai}$  = concentrazione massima consentita (mg/m<sup>3</sup>);
- $x_{mi}$  = concentrazione misurata (mg/m<sup>3</sup>).

Chiaramente, un siffatto indice perde di significato per

$$x_{mi} > 2x_{ai} .$$

Esso varierà tra 0 ed 1; un valore prossimo a 1 significa assenza di questi contaminanti chimici, mentre valori prossimi a 0 indicano elevato inquinamento chimico di queste sostanze.

Per una lettura più chiara della salubrità dell'aria ci si riferisce agli stessi sopra definiti indici ma normalizzati rispetto al valore massimo, cioè

$$i_i^0 = \frac{i_i}{(i_i)_{max}}$$

dove:

$i_i$  = indice di qualità dell'aria per un generico contaminante;

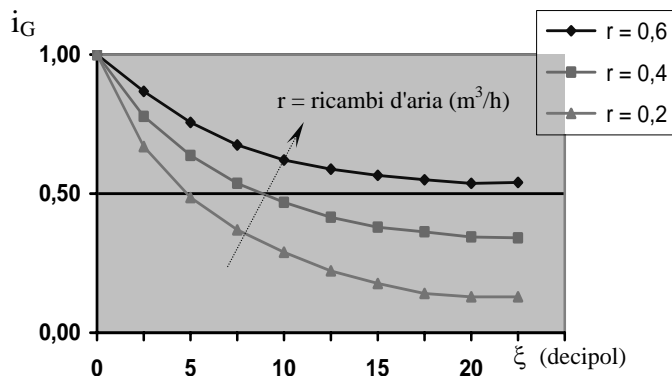
$(i_i)_{max}$  = massimo valore dell'indice di inquinamento  $i_i$ .

A questo punto si può definire, limitatamente a tutti questi contaminanti chimici, un indice globale di inquinamento:

$$i_G = \frac{\sum_{i=1}^n x_{mi} i_i^0}{\sum_{i=1}^n x_{mi}}$$

Un tale indice, basato sulla media pesata delle concentrazioni degli inquinanti considerati, rappresenta un facile ed utile strumento per valutare, con semplicità ed immediatezza, a seconda dei ricambi d'aria, la presenza o meno di inquinamento chimico nell'aria interna in esame.

Infatti, a titolo puramente indicativo ed esemplificativo, nella **Figura 1** si riporta l'andamento di  $i_G$  con il potere inquinante complessivo di questa sostanza  $\xi$  (in decipol) al variare dei ricambi d'aria previsti nell'ambiente chiuso di che trattasi. In particolare,  $\xi$  rappresenta, secondo la teoria di Fanger, l'effetto olfattivo globale dell'inquinamento.



**Figura 1:** Indice globale di inquinamento dell'aria interna

## 3. LE COMBUSTIONI LIBERE ATTIVE NEGLI AMBIENTI INTERNI

La presenza di fiamme libere, destinate soprattutto alla cottura dei cibi, costituisce una sorgente di inquinamento

indoor di notevole importanza.

Infatti, essa dà luogo alla formazione di numerosi prodotti di combustione, nocivi sia la salute delle persone che alle cose circostanti.

È chiaro che i microinquinanti prodotti dalle fiamme in ambienti confinati dipendono dal tipo di combustibile bruciato. I combustibili generalmente utilizzati nella cottura dei cibi e/o nel riscaldamento domestico sono il metano, il carbone, il kerosene e la legna.

In questo paragrafo si quantifica, attraverso un indice adimensionale, il contributo delle fiamme libere all'inquinamento dell'aria interna, considerando i diversi tipi di combustibile che possono essere utilizzati.

Questo indice discende sia dalle proprietà fisiche di ogni tipo di combustibile impiegato (**Tabella 2**), sia dal contenuto di inquinanti (**Tabella 3**) prodotti nelle loro combustioni standard.

**Tabella 2:** Proprietà termofisiche dei combustibili

Combustibile	Calore specifico $c_p$ (kcal/kg °C)	Potere calorifico inferiore $P_{ci}$ (kcal/kg)	Temperatura di combustione $T_c$ (°C)
Legna	0,200	4,250	1400
Metano	0,531	11,900	1745
Carbone	0,300	7,620	2000
Kerosene	0,480	8,100	1800

**Tabella 3:** Percentuale in massa di inquinanti nei prodotti di combustione

N	Combustibile	Inquinanti contenuti nei prodotti di combustione (kg/kg di combustibile)				
		CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	N <sub>x</sub> O	polveri e prodotti non combustibili	H <sub>2</sub> O
<i>a</i>	Legna	1,790	0,015	0,090	0,150	2,300
<i>b</i>	Metano	2,750	0,030	0,080	0,000	2,154
<i>c</i>	Carbone	1,893	0,012	0,090	0,100	0,633
<i>d</i>	Kerosene	1,970	0,010	0,010	0,860	1,250
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

Definiamo, dunque, gli indici di inquinamento da combustione:

$$i_{jk} = 1 - \frac{x_{jk}}{P_{ci}(c_p \cdot T_c)^{-1}}$$

in cui:

- $j$  rappresenta il  $j$ -esimo combustibile ( $j = a \div d$ );
- $k$  rappresenta il  $k$ -esimo inquinante ( $k = 1 \div 5$ );

e dove:

- $x_{jk}$  = concentrazioni in massa delle sostanze inquinanti prodotte dalla combustione (espresso in  $kg_{fumi}/kg_{combustibile}$ );
- $P_{ci}$  = potere calorifico inferiore (in kcal/kg);
- $c_p$  = calore specifico a pressione costante (espresso in kcal/kg °C);
- $T_c$  = temperatura di combustione (in °C).

Abbiamo costruito 20 = 4 × 5 indici  $i_{jk}$  di inquinamento, nei quali le concentrazioni sono rapportate al contenuto energetico di ciascuno dei quattro combustibili; questo è adimensionalizzato nella forma  $P_{ci}/(c_p T_c)$ .

Si osservi che gli indici sono sempre < 1 : il valore 1 corrisponde ad assenza di inquinanti.

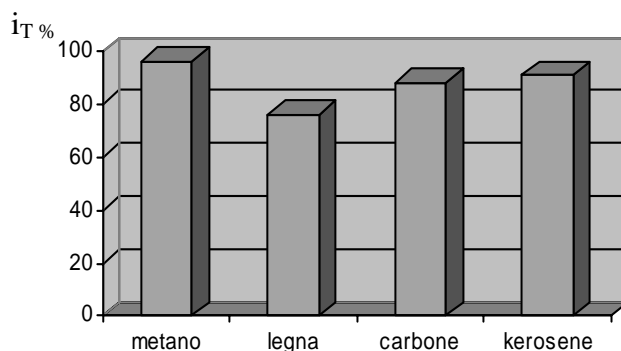
Da questi possiamo desumere un indice normalizzato, legandolo al valore massimo, come

$$i_{jk}^0 = \frac{i_{jk}}{i_{jkmax}}$$

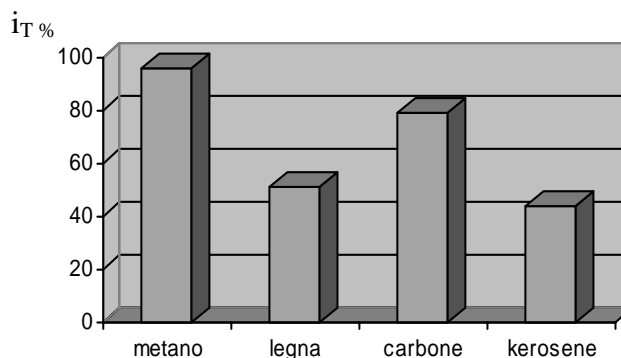
da utilizzare nella definizione dell'indice totale:

$$i_T = \prod i_{jk}^0$$

Esso, nelle **Figure 2 e 3**, stima, in forma percentuale, l'entità globale dell'inquinamento interno prodotto dalla presenza attiva di fiamme libere, per ogni combustibile.



**Figura 2:** Indici totali di inquinamento senza acqua



**Figura 3:** Indici totali di inquinamento con acqua

#### 4. LE RADIAZIONI, IONIZZANTI E NON, PRESENTI NELL'ARIA INTERNA

Nell'aria indoor ci sono, di tipo prettamente fisico, altri inquinanti che possono arrecare danni alle persone e/o cose ivi

presenti. Essi sono, sostanzialmente, riconducibili alle radiazioni ionizzanti ed all'attività nucleare del radon. Qui di seguito evidenziamo separatamente la dimensione del problema e le caratteristiche di questi altri agenti nocivi.

## Radon

È un gas radioattivo che si forma dalla disintegrazione del radio-226. Il radon, a sua volta, si disintegra generando una serie di radionuclidi instabili come il polonio-218, il piombo-214, il bismuto-214 e il polonio-214 che, per la loro bassa tensione di vapore, si ritrovano come particelle sospese. Si ha quindi la possibilità che queste si depositino sulle mucose bronchiali cedendo energia e provocando una trasformazione neoplastica delle cellule dell'apparato respiratorio.

Il radon viene emesso dal suolo in misura variabile in funzione delle caratteristiche geolitologiche: i valori più alti si hanno in corrispondenza di zone vulcaniche dove abbondano tufi e lave.

Esso può infiltrarsi nei locali scantinati o nelle stanze poste su vespaio al piano terreno di edifici, seguendo percorsi diversi: attraverso le solette in calcestruzzo; attraverso le fessurazioni e le crepe nelle murature di fondazione; attraverso i punti di ingresso delle condutture di acqua, gas, scarichi, etc.

Le concentrazioni interne di questo agente nocivo sono determinate, quindi, dal tipo di suolo sottostante, dalla presenza o meno di sistemi di isolamento del manufatto dal terreno di fondazione, dai materiali di costruzione utilizzati.

Ricerche condotte in paesi europei hanno dimostrato concentrazioni medie di radon all'interno di edifici intorno ai 50 Bq/m<sup>3</sup>.

Recenti studi italiani hanno individuato in 117 Bq/m<sup>3</sup> il valore medio della concentrazione di radon nelle abitazioni lombarde, a fronte di un valore medio nazionale di 77 Bq/m<sup>3</sup>.

Comunque, le concentrazioni ammissibili si attestano a 400 Bq/m<sup>3</sup> per edifici esistenti ed a 200 Bq/m<sup>3</sup> per quelli di nuova costruzione.

Per valutare, perciò, l'inquinamento da radon definiamo il seguente indice di qualità:

$$i_{\text{radon}} = 1 - \frac{c_m}{c_a}$$

con

$c_a$  = concentrazione di radon ammissibile (Bq/m<sup>3</sup>);

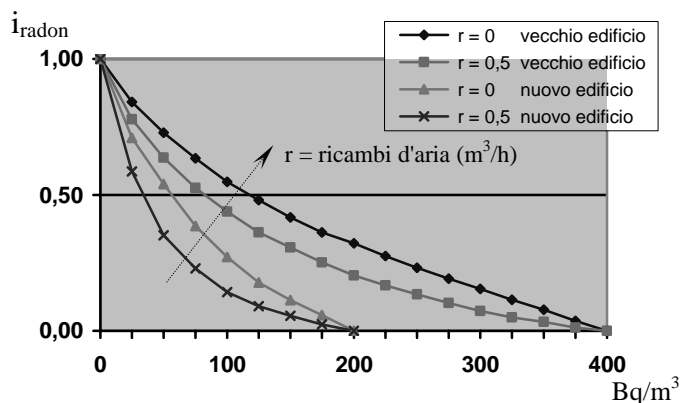
$c_m$  = concentrazione di radon misurata (Bq/m<sup>3</sup>).

Esso varia tra 0 e 1. Un valore di  $i_{\text{radon}} = 0$  significa una concentrazione del radionucleide pari a quella ammissibile;  $i_{\text{radon}} = 1$  implica assenza totale di radon. Quando si ha una concentrazione misurata maggiore di quella ammissibile l'indice perde di significato. L'andamento dell'indice in funzione della concentrazione è rappresentato, a seconda della portata di ventilazione, nella **Figura 4**.

## Radiazioni elettromagnetiche

Da molti anni si è presa coscienza dei rischi che si corrono per la salute qualora si abiti in ambienti prossimi a linee o installazioni elettriche ad alta tensione (220/380 kV) nonché a punti di trasmissione in radiofrequenze.

Anche i campi elettromagnetici a bassa frequenza, esistenti negli ambienti abitati, hanno destato nell'opinione pubblica un



**Figura 4:** Indice di nocività del radon

certo allarme per i loro effetti nocivi.

Le rilevazioni strumentali eseguite da vari Enti all'interno di abitazioni, ed al centro di ogni ambiente, situate in prossimità di linee elettriche ad alta tensione, hanno evidenziato livelli di campo elettrico compresi fra 1 e 5 V/m e campi magnetici compresi tra 0,05 e 2,6  $\mu\text{T}$ .

In particolare, è notorio che le diverse apparecchiature elettriche, normalmente impiegate negli ambienti indoor, generano, quando sono in funzione, sia un campo elettrico che un campo magnetico così come rappresentato in **Tabella 4**.

**Tabella 4:** Campi magnetico ed elettrico generato da alcuni elettrodomestici

Elettrodomestici	Campo magnetico $H$ ( $\mu\text{T}$ ) a distanza di			Campo elettrico $E$ (V/m) a distanza di 30 cm
	3 cm	30 cm	100 cm	
Frigorifero	0,5÷1,7	0,01÷0,25	< 0,01	60
Ferro da stiro	8÷30	0,12÷0,30	0,01÷0,025	60
Tostapane	7÷18	0,06÷0,70	< 0,01	40
Asciugacapelli	6÷2000	< 0,01÷1	< 0,01÷3	40
Televisore	25÷50	0,04÷2	< 0,01÷0,15	30
Aspirapolvere	200÷800	2÷20	0,13÷2	16
Forno elettrico	1÷50	0,15÷0,50	0,01÷1	4

Dall'analisi delle misure è emerso che il campo magnetico di fondo a 50 Hz, negli ambienti confinati di tipo domestico, presenta una notevole variabilità temporale, con una ciclicità giorno/notte; esso risulta più elevato negli appartamenti condominiali e minore nelle abitazioni singole.

Il campo magnetico è quello che dà maggiore preoccupazione in quanto quello elettrico viene facilmente schermato.

Il limite di campo magnetico ammesso negli ambienti indoor abitativi è di 0,1÷0,3  $\mu\text{T}$ .

Per quantificare la nocività di questi agenti fisici di inquinamento facciamo riferimento, anche qui, ad appositi indici.

Precisamente definiamo l'indice di campo elettrico  $i_E$  e di campo magnetico  $i_M$ :

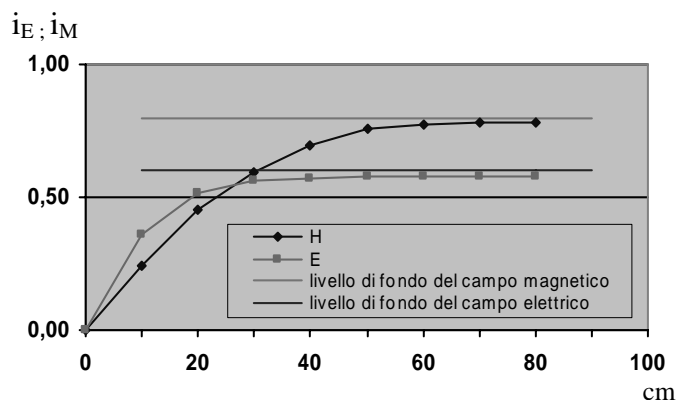
$$i_E = 1 - \frac{E}{K \cdot P} \quad i_M = 1 - \frac{H}{10^9 \cdot P} \cdot \frac{V}{V \cdot D_f}$$

in cui:

- K = costante di riduzione =  $10^3$ ;
- E = campo elettrico misurato (V/m);
- H = campo magnetico misurato ( $\mu T$ );
- P = potenza installata (W);
- d = dimensione lineare caratteristica dell'ambiente =  $1/3 (b+l+h)$  (m);
- I = corrente di linea (A);
- V = tensione di linea (V);
- $D_f$  = diametro del conduttore di terra (m).

Tali indici mostrano l'assenza di radiazioni ionizzanti per valori prossimi ad 1.

La variazione di  $i_E$  e  $i_M$  con la distanza dalla sorgente è schematicamente rappresentata nella **Figura 5**.

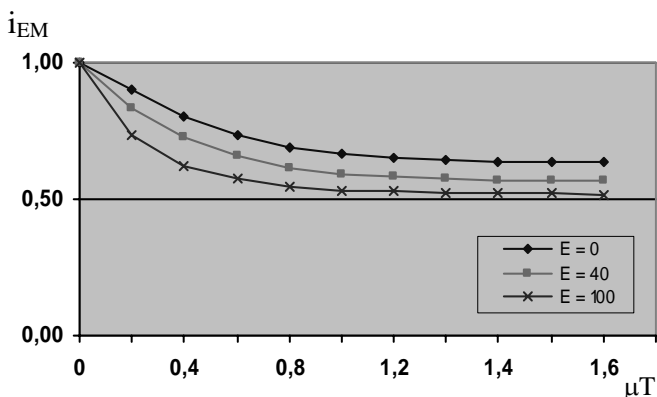


**Figura 5:** Indici del campo elettrico del campo magnetico in funzione della distanza

L'effetto combinato di campo elettrico e magnetico può essere espresso da un indice prodotto:

$$i_{EM} = i_E \cdot i_M$$

La variazione di tale indice complessivo con le rispettive intensità di campo presenti è rappresentata nella **Figura 6**.



**Figura 6:** Indice di qualità ambientale elettromagnetico in funzione dei campi E ed H

## 5. CONCLUSIONI E COMMENTI

La contaminazione dell'aria negli edifici o più generalmente negli ambienti confinati dipende da molti tipi di inquinanti chimici e fisici presenti.

Il primo inquinamento considerato in questa sede è quello dovuto alla presenza di sostanze chimiche. Per esso è stato calcolato un indice di impatto complessivo, che quantifica l'inquinamento a seconda dell'entità "odorigena" presente nell'ambiente chiuso di che trattasi.

Per quanto attiene alla nocività del radon e delle radiazioni elettromagnetiche, si rimanda alle **Figure 4, 5 e 6** del capitolo 4.

Esse correlano rispettivamente l'indice di qualità ambientale specifico con la concentrazione di radon e dei campi elettrici e magnetici misurati nell'ambiente confinato.

Il problema del radon può essere risolto semplicemente con particolari accorgimenti costruttivi: isolare la roccia di fondazione dal piano scantinato degli edifici.

La questione elettromagnetica rimane un pericolo per le costruzioni edificate vicino a linee elettriche ad alta tensione o a ponti di radiofrequenza. Infatti, in questi casi, si produce un campo magnetico di fondo all'interno dell'edificio, difficile da rimuovere o debellare.

Un discorso a parte è stato fatto sull'inquinamento prodotto da fiamme libere per la cottura dei cibi e/o per il riscaldamento domestico in ambienti confinati.

I risultati sono stati compendati negli istogrammi delle **Figure 2 e 3**.

Essi evidenziano l'impatto chimico da combustione a seconda del tipo di combustibile impiegato.

Precisamente le figure mostrano una migliore posizione di graduatoria del metano rispetto alle altre tipologie di fiamma presenti nell'ambiente interno di che trattasi.

Seguono, poi, in ordine scalare di graduatoria, il carbone, il kerosene e la legna.

Qualche debolezza nell'approccio proposto nella valutazione dell'inquinamento da fiamme libere in ambito indoor la si trova nel fatto di aver considerato le reazioni di combustione in forma stechiometrica. Invece i processi reali delle suddette combustioni portano alla formazione di formaldeide, valutabile peraltro nei fornelli a gas, in 15÷20 mg/h [18].

Quale conclusione finale si può dire che la qualità dell'aria all'interno di edifici potrà essere valutata da un indice complessivo secondo le seguenti formule:

$$i_{IAQ} = \left( \prod_{i=1}^n i_h \right)^{\frac{1}{n}}$$

dove

- n = numero di impatti considerati;
- $i_h$  = i-esimo impatto.

Nella fattispecie del nostro caso esso diventa:

$$i_{IAQ} = (i_G \cdot i_{EM} \cdot i_{radon} \cdot i_T)^{\frac{1}{6}}$$

Questo indice fornisce sicuramente uno strumento facilmente intelligibile per valutare la salubrità ed igienicità dell'aria interna in relazioni alle sostanze chimiche, alle

combustioni ed agli agenti fisici ivi presenti. Esso varia tra 0 ed 1 : a zero corrisponde una situazione inaccettabile, ad 1 l'esistenza di un ambiente confinato incontaminato.

La sensibilità dell'algoritmo proposto per la valutazione dell'IAQ è rappresentata dall'esponente  $n/n!$ . Infatti tale artificio fa allargare il campo di variazione tra i diversi impatti considerati.

Un siffatto indice potrà essere agevolmente adoperato sia in programmi di igiene e bonifica di ambienti abitativi e lavorativi che nel monitoraggio del rischio di ambienti confinati di qualsivoglia tipo.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Air Quality Guidelines for Europe, WHO, Copenhagen, Denmark, 1987.
2. G. Nicoletti, The Hydrogen Option for Energy: A Review of Technical Environmental and Economic Aspect, International Journal of Hydrogen Energy, Pergamon Press, USA, 1995.
3. R. Arienti, G. Nicoletti, M. Buttiglieri, Combustion Quality Indices of Hydrogen and other Fuel, 9<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference, Jerusalem Israel, 1990.
4. R. Arienti, G. Nicoletti, M. Buttiglieri, I valori limiti di soglia per sostanze chimiche ed agenti fisici negli ambienti di lavoro, Ed CLUED, Milano, 1982.
5. M. Maroni, Habitat costruito, inquinamento e salute, Edizioni Franco Angeli, Milano (Italy), 1991.
6. F. Bochicchio, Scenario of Radon Indoors in Italy and Regulatory Policy, International Conference Healthy Building, September 10-14, Milano (Italy), 1995.
7. EPA (Environmental Protection Agency) Application of Radon Reduction Methods, n. 635/5-88/24, Washington D.C. (U.S.A.), 1988.
8. C. Carletti, Contaminazione dell'aria da gas Radon: Modalità di propagazione, Tecniche di valutazione ed efficienza, Strategie di controllo, 53° Congresso Nazionale ATI, Firenze (Italia), 1998.
9. M. Grandolfo (et al.), Biological Effects and Dosimetry of Static and ELF Electromagnetic Fields, Plenum Press, New York (U.S.A.), 1983.
10. P. Bevitori, A. Ravioli, Inquinamento elettromagnetico, Rivista medica del Friuli, vol. 2, n. 3, Italy, 1996.
11. G. Santanociti, Inquinamento Elettromagnetico: un conflitto aperto, Web Internet, <http://www.reteambiente.it>, 2000.
11. Il rischio elettromagnetico nella vita quotidiana, Web Internet, <http://www.reteambiente.it>, 2001.
12. L. Cassitto, P. Magnani, Gli indici di qualità ambientale: proposte per una formulazione quantitativa, Report policlinico di Milano (Italy), 1979.
13. M. Masoere, Emissioni di inquinanti da impianti termici, Convegno AICARR Impatto degli impianti di riscaldamento e condizionamento sull'ambiente esterno, 1990.
14. G. Nicoletti, Inquinamento atmosferico da combustione: Un approccio termodinamico, La Termotecnica, settembre, 1994.
15. R. Arienti, L. Cassitto, Inquinamento urbano da riscaldamento: alternative pulite agli attuali combustibili e proposte per una efficace prevenzione, Rapporto non pubblicato, 1974.
16. T. N. Veziroglu, Economic Comparison of Solar Hydrogen Energy System with Fossil Fuel System, Solar Wasserstoff Versorgung International Symposium, Zurich, 1989.
17. R. Arienti, G. Nicoletti, La definizione di un indice entropico ambientale di alcuni combustibili, Congresso Nazionale ATI, Cagliari, 1990.
18. G. Nicoletti, G. Alitto, F. Anile, Misure e strategie nell'inquinamento urbano da riscaldamento, 7° Congresso Nazionale CIRIAF, Perugia, 31 marzo 2007.
19. G. Alitto, G. Nicoletti, Il rischio del radon negli ambienti confinati, IA Ingegneria Ambientale, Vol XXXV n. 5, maggio 2006.

## UN MODELLO STATISTICO PER LA PREVISIONE DEI LIVELLI DI CONCENTRAZIONE DEI PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE IN AMBIENTI DOMESTICI

Milone Angelo<sup>(1)</sup> Milone Daniele<sup>(1)</sup> Pitruzzella Salvatore<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Dipartimento Ricerche Energetiche ed Ambientali. Università di Palermo

<sup>(2)</sup> Dipartimento Ingegneria Civile. Università di Messina

### SOMMARIO

Questo studio mostra i risultati di una campagna sperimentale effettuata all'interno di ambienti cucina, i cui apparecchi sono alimentati da gas metano. Le misurazioni hanno riguardato i livelli di concentrazione di CO, della temperatura dell'aria e del vapore acqueo, in un periodo di sette giorni in cinquanta cucine poste all'interno di altrettante abitazioni facenti parte di un complesso edilizio sito a Palermo.

I rilievi sperimentali sono stati accompagnati da un'indagine di tipo statistico, effettuata attraverso la redazione di un diario standardizzato dove venivano registrati dagli stessi utenti, alcune informazioni circa l'utilizzo degli apparecchi di cottura. Attraverso i dati sperimentali e le indicazioni statistiche è stato possibile pervenire ad un indice sulla qualità dell'aria interna delle cucine domestiche, già sperimentato da altri studiosi, e che si basa sulla probabilità di accumulo dei prodotti da combustione (CACP index).

### PREMESSA

In questo studio viene descritta una metodologia statistica per la previsione dei livelli di concentrazione di CO e CO<sub>2</sub> provenienti dalla combustione nelle cucine delle abitazioni civili, ove si fa prevalentemente uso di gas metano.

Tale metodo statistico, per il quale è in corso una campagna sperimentale per la sua validazione, sostanzialmente prevede una indagine basata su un questionario che mette in relazione le dimensioni dell'ambiente, il tipo di ventilazione dell'ambiente, il tempo impiegato per la cottura dei cibi.

Attraverso l'interpretazione di tali questionari, correlati con una indagine sperimentale sul campo si vuole pervenire alla determinazione di un indice di qualità dell'aria come Probabilità di Accumulo dei Prodotti di Combustione (PAPC).

### METODOLOGIA

È stato individuato, sulla scorta di un modello già utilizzato da alcuni studiosi Olandesi (*Willers et al.*) un questionario che è stato distribuito in 50 abitazioni di un complesso edilizio di Palermo.

Tale questionario di cui si riporta in tabella 1 uno schema, prevede le seguenti informazioni in una successione ben precisa:

- 1) Utilizzo del gas in cucina: definisce la tipologia del tipo di cucina impiegata, distinguendo se a gas o elettriche;
- 2) Ventilazione artificiale: definisce la possibilità di usufruire di una ventilazione accessoria (cappa di aspirazione) e quindi di estrazione dell'aria; all'interno di questa domanda viene chiesto quanto questo tipo di ventilazione viene attivata (all'inizio, durante, alla fine della cottura);
- 3) Volume dell'ambiente: vengono definite due tipologie di

cucine, grandi se con dimensioni > 30m<sup>3</sup>, piccole se con dimensioni < 30 m<sup>3</sup>; all'interno di questa domanda viene chiesto se l'ambiente cucina è abitabile, ossia se c'è la possibilità (o la consuetudine) di consumare i pasti là dove si cucinano.

- 4) Ventilazione naturale: definisce la presenza di una finestra come rapporto tra la superficie della finestra e la superficie dell'ambiente, elevata se > 10%, insufficiente se < 10%;
- 5) Altre sorgenti: definisce la possibilità di sorgenti estranei alla cucina come la presenza di caldaie o stufe per il riscaldamento.

Tabella 1: Questionario distribuito

<b>1</b>	Gas	<input type="checkbox"/> sì <input type="checkbox"/> no (indicare quale combustibile _____)
<b>2</b>	Ventilazione artificiale	<input type="checkbox"/> sì <input type="checkbox"/> no Se si rispondere sull'uso <input type="checkbox"/> dall'inizio <input type="checkbox"/> durante <input type="checkbox"/> alla fine
<b>3</b>	Volume della cucina	<input type="checkbox"/> > 30 m <sup>3</sup> <input type="checkbox"/> < 30 m <sup>3</sup> <input type="checkbox"/> Abitabile <input type="checkbox"/> non abitabile
<b>4</b>	Ventilazione naturale	<input type="checkbox"/> Finestra <input type="checkbox"/> Non finestra Se finestra rispondere <input type="checkbox"/> > 10 % <input type="checkbox"/> < 10 %
<b>5</b>	Altre sorgenti	<input type="checkbox"/> sì (specificare _____) <input type="checkbox"/> no

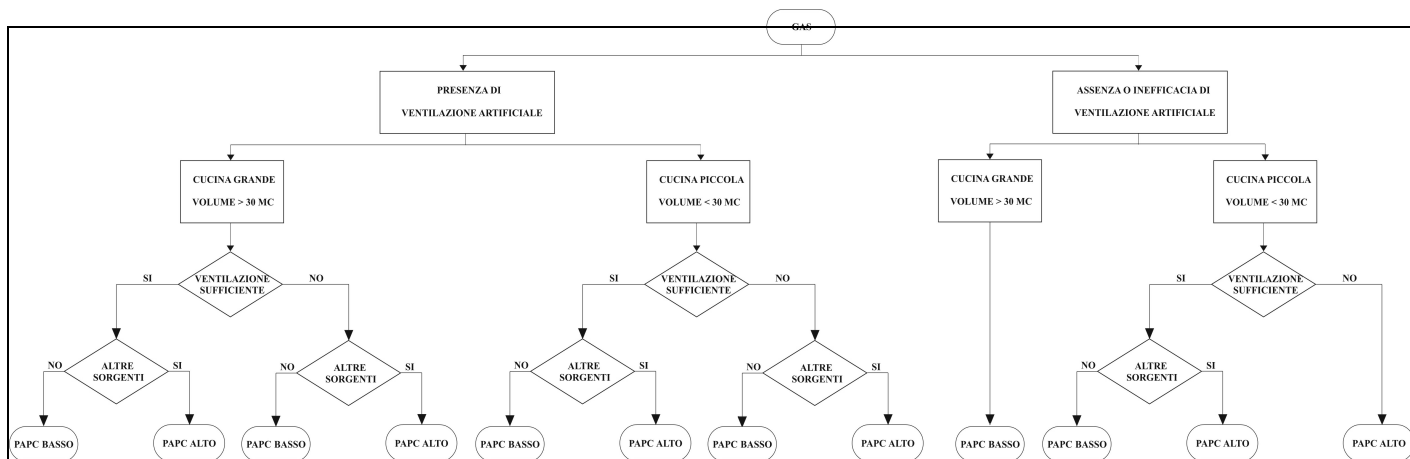


Figura 1. Flowchart del modello di PAPC per cucine alimentate a gas.

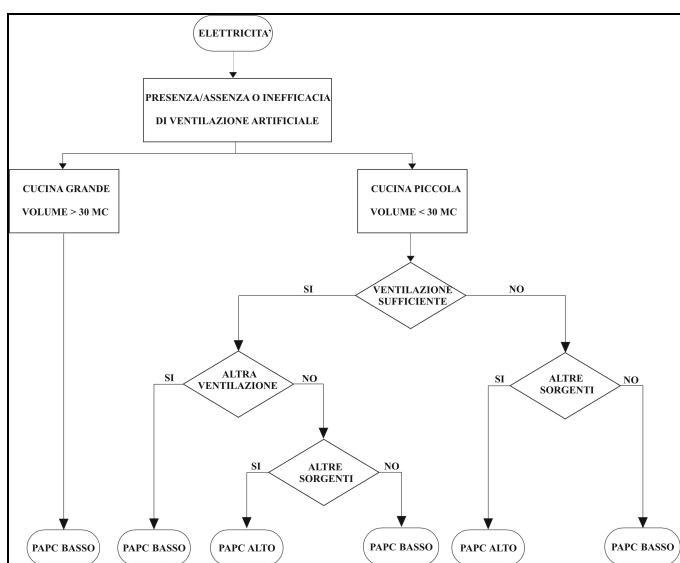


Figura 2. Flowchart del modello di PAPC per cucine alimentate ad energia elettrica.

Attraverso le flowcharts descritte nelle figure 1 e 2 che rappresentano tutte le possibili combinazioni (12+6) dei parametri descritti si può pervenire ad un primo indice sulla probabilità di accumulo di prodotti da combustione.

Oltre al questionario è stato distribuito alle famiglie un diario da utilizzare nella settimana in cui avvengono i rilevamenti sperimentali.

In particolare nel suddetto diario doveva essere annotato il periodo e la durata dell' accensione del gas, l'uso della cappa di estrazione, l'apertura della finestra.

Poiché invece scopo della presente ricerca è quello di individuare un indice numerico (PAPC index) si è proceduto metodologicamente nel seguente modo:

- Indagine puramente statistica volta a determinare le possibili combinazioni dei parametri già individuati; questa indagine è stata già condotta con la distribuzione dei questionari di cui alla precedente tabella 1 e del diario che ha dato i risultati riportati nella Tabella 2.
- Misurazione dei livelli di concentrazione giornaliera di CO e CO<sub>2</sub> in quattro cucine campione che presentavano le seguenti caratteristiche:

- *Cucina 1*: Presenza di cappa che viene accesa durante la cottura; Volume 27,3 m<sup>3</sup>; Superficie finestra 1,8m<sup>2</sup>;

senza sorgenti interne.

- *Cucina 2*: Presenza di cappa che viene accesa durante la cottura; Volume 42,6 m<sup>3</sup>; Superficie finestra 1,8m<sup>2</sup>; senza sorgenti interne.
- *Cucina 3*: Presenza di cappa che viene accesa alla fine della cottura; Volume 46,7 m<sup>3</sup>; Superficie finestra 1,8m<sup>2</sup>; senza sorgenti interne.
- *Cucina 4*: Non c'è presenza di cappa; Volume 37,3 m<sup>3</sup>; Superficie finestra 1,4m<sup>2</sup>; senza sorgenti interne. I risultati di tali rilevamenti vengono riportati nelle figure 1 e 2.

Tabella 2. Analisi dei risultati dei questionari.

Parametri	N	%
Cucina a Gas	46/50	92.0
Ventilazione artificiale	27/50	54.0
Volume cucina grande	19/50	38.0
Volume cucina piccolo	31/50	62.0
Ventilazione naturale elevata	32/50	64.0
Ventilazione naturale insufficiente	18/50	36.0
Altre sorgenti	6/50	12.0

Questi primi risultati conducono alle considerazioni che:

- L'utilizzo della cappa di estrazione durante la cottura dei cibi fa mantenere i valori di concentrazione al di sotto delle medie statistiche conosciute<sup>1</sup>;
- L'utilizzo della cappa di estrazione alla fine della cottura fa diminuire le concentrazioni solo dopo due ore dalla cottura;
- Che con l'assenza di cappa di estrazione, anche in presenza di un elevato volume della cucina, si hanno valori di picco superiori molto elevati.

L'esame di tali risultati ha permesso di determinare una prima classificazione dei quattro parametri assegnando loro il peso percentuale riportato nella tabella 3.

<sup>1</sup> Sono stati assunti come valori limite quelli proposti dall'OMS in "Air quality guidelines for Europe" che pone come picco per il CO 100 mg/m<sup>3</sup> e come media nelle 8 ore di 10 mg/m<sup>3</sup> e per il CO<sub>2</sub> rispettivamente di 54.000 mg/m<sup>3</sup> e 9.000 mg/m<sup>3</sup>

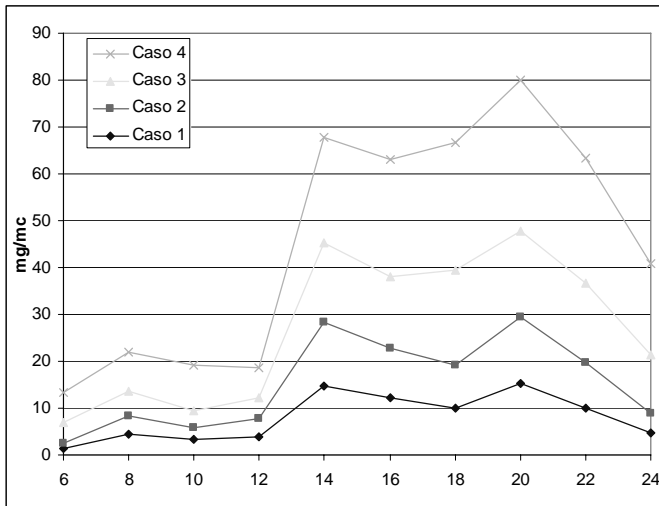


Figura 3. Rilevamento dei valori di concentrazioni di CO nelle quattro cucine campioni.

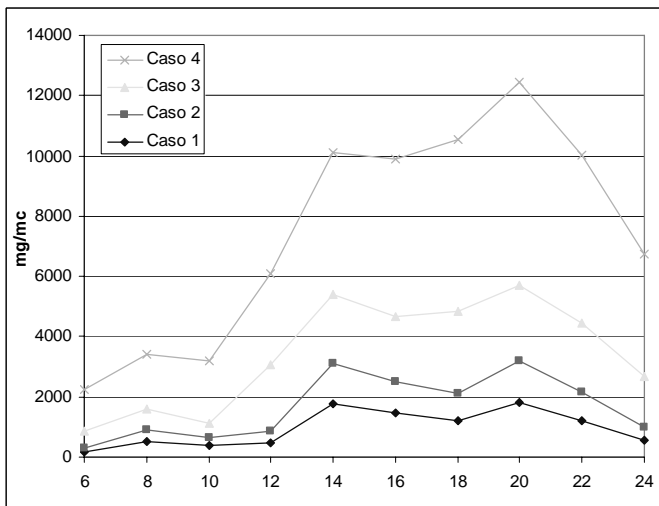


Figura 4. Rilevamento dei valori di concentrazioni di CO<sub>2</sub> nelle quattro cucine campioni.

Tabella 3. Valori assegnati ai parametri individuati

Ventilazione artificiale	45	Inizio	15
		Durante	30
		Fine	45
Volume dell'ambiente	20	20 m <sup>3</sup>	20
		30 m <sup>3</sup>	10
		≥ 40 m <sup>3</sup>	5
Ventilazione naturale	25	5 %	25
		10 %	20
		15 %	10
		≥ 20 %	5
Altre sorgenti	10		10
<b>Totale</b>	<b>100</b>		<b>100</b>

Seguendo la flowcharte per le quattro cucine si avrebbe:

- Cucina 1: **PAPC** "basso".
- Cucina 2: **PAPC** "basso".
- Cucina 3: **PAPC** "basso".
- Cucina 4: **PAPC** "alto".

Se invece si assegnano i punteggi prefissati si avrebbe:

- Cucina 1: **PAPC index** "40"
- Cucina 2: **PAPC index** "45"
- Cucina 3: **PAPC index** "55"
- Cucina 4: **PAPC index** "90"

Attraverso la comparazione dei due metodi di può in prima approssimazione indicare come valore limite tra PAPC basso e PAPC alto il valore di 60/100.

L'acquisizione dei dati complessivi, per i quali è necessario un tempo di campionamento molto lungo, considerato il numero degli ambienti e quindi della strumentazione necessaria, consentirà la validazione degli indici statistici di cui alla tabella 3.

## STRUMENTAZIONE

Per i rilevamenti di CO e CO<sub>2</sub> all'interno delle cucine, si è adoperato un multiaquisitore Babuc/A con 11 ingressi equipaggiato con:

- Sonda per la misura della concentrazione del monossido di carbonio (CO), con cella elettrochimica, range di misura da 0 a 1000 mg/m<sup>3</sup>, con risoluzione di 0,5 mg/m<sup>3</sup>;
- Sonda per la misura della concentrazione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), con cella ad assorbimento di infrarosso, range di misura da 0 a 20.000 mg/m<sup>3</sup>, con risoluzione di 10 mg/m<sup>3</sup>.



Figura 5. Sonde per la misura del CO e del CO<sub>2</sub>.

Per l'acquisizione dei dati si è interfacciato il multiaquisitore ad un computer portatile equipaggiato con il software InfoGAP-Evoluto.

Tale software permette la comunicazione dati diretta da sistemi BabucM/A/ABC, archiviazione e classificazione delle misure con logiche di estrazione, grafici e tabelle dei dati grezzi acquisiti e di valori rielaborati, generazione di bollettini di misura.

Il posizionamento della strumentazione all'interno degli ambienti cucina è stato fatto in modo da non intralciare la normale deambulazione degli occupanti.

Si è avuto cura di posizionare le sonde in posizione perpendicolare rispetto ai fornelli, ed a seconda dei casi ad una distanza inferiore ai 50 cm. e non più lontana di 3 m. dagli stessi, in un'area perfettamente esposta, non in un angolo o fra ostacoli alti.

L'altezza di posizionamento è stata sempre compresa tra i 100 ed i 150 cm da terra e in modo da non essere investita direttamente da un flusso d'aria.

## CONCLUSIONI

Questa prima parte della ricerca ha confermato la possibilità di utilizzare un modello previsionale derivato dalle caratteristiche specifiche di ventilazione all'interno delle cucine; modello che permette di classificare come "bassa" o "alta" la probabilità di accumulo.

La correlazione con i dati sperimentali, in parte già raccolti, permetterà di validare i pesi assegnati ad ogni parametro, eventualmente modificarli, aggiungerne ulteriori, in modo da pervenire ad un PAPC Index rappresentativo dell'ambiente cucina.

## BIBLIOGRAFIA

1. Willers S. M, Brunekreef B., Oldenwening M., Smit H. A., Kerkhof M., De Vries H., Gas cooking, kitchen ventilation, and exposure to combustion products. *Indoor Air* 2006 n. 6
2. Brunekreef, B. (2001) NO<sub>2</sub>: the gas that won't go away, *Clin. Exp. Allergy*, 31.
3. Dijkstra, L., Houthuijs, D., Akkerman, I. and Brunekreef, B. (1988) Health effects of indoor exposure to nitrogen dioxide and tobacco smoke. In: Perry, R. and Kirk, P.W. (eds) *Indoor and Ambient Air Quality*, Selper, London, 277-286.
4. Milone A. et al., (2004) Valutazione dei livelli di monossido di carbonio in ambiente scolastico: Un caso di studio. In *Atti 4° Congresso Nazionale CIRIAF*
5. Garrett, M.H., Hooper, M.A., Hooper, B.M. and Abramson, M.J. (1998) Respiratory symptoms in children and indoor exposure to nitrogen dioxide and gas stoves, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 158.
6. Barck, C., Lundahl, J., Hallden, G. and Bylin, G. (2004) Brief exposure to NO<sub>2</sub> augment the allergic inflammation in asthmatics, *Environ. Res.*, 97.
7. Baumeister, T., Avallone, E.A. and Baumeister, T., III (1978) *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers*, McGraw-Hill, New York.
8. Fischer, P., Brunekreef, B. and Boleij, J.S. (1986) Indoor NO<sub>2</sub> pollution and personal exposure to NO<sub>2</sub> in two areas with different outdoor NO<sub>2</sub> pollution, *Environ. Monit. Assess.*, 6.
9. Jarvis, D., Chinn, S., Luczynska, C. and Burney, P. (1996) Association of respiratory symptoms and lung function in young adults with use of domestic gas appliances, *Lancet.*, 347.
10. Keller, M.D., Lanese, R.R., Mitchell, R.I. and Cote, R.W. (1979) Respiratory illness in households using gas and electricity for cooking I. Survey of incidence, *Environ. Res.*, 19.
11. Moran, S.E., Strachan, D.P., Johnston, I.D. and Anderson, H.R. (1999) Effects of exposure to gas cooking in childhood and adulthood on respiratory symptoms, allergic sensitisation and lung function in young British adults, *Clin. Exp. Allergy*, 29.
12. Speizer, F.E., Ferris, B.G., Jr, Bishop, Y. and Spengler, J.D. (1980) Respiratory disease rates and pulmonary function in children associated with NO<sub>2</sub> exposure, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 121.
13. Spicer, C. and Billick, I. (1995) Persistence and fate of natural gas appliance emissions, *Proc. Int. Gas Res. Conf.*, 2.
14. Wong, T.W., Yu, T.S., Liu, H.J. and Wong, A.H. (2004) Household gas cooking: a risk factor for respiratory illnesses in preschool children, *Arch. Dis. Child*, 89.
15. UNI 7129:1992 (1997) UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Impianti a gas per uso domestico alimentati da rete di Distribuzione Progettazione, installazione e manutenzione.

## CONTROLLO TERMOIGROMETRICO INDOOR NEGLI SPAZI MUSEALI: ANALISI DI UN EDIFICIO IN EVOLUZIONE CLIMATICA LIBERA

Antonino D’Orso, Maria La Gennusa, Gianfranco Rizzo, Gianluca Scaccianoce

Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM), Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italia. Tel. +39 091 236225; Fax +39 091 484425; e-mail: scaccianoce@dream.unipa.it.

### SOMMARIO

Nei musei, le condizioni ambientali interne dovrebbero, nello stesso tempo, assolvere due compiti fondamentali: preservare le opere d’arte ivi esposte e garantire buone condizioni di comfort per i visitatori e per le persone che vi lavorano. Purtroppo, i requisiti ottimali per le persone e per le opere d’arte sono caratterizzati da differenti valori dei parametri fisici all’interno degli ambienti museali che, occasionalmente, possono entrare in conflitto. Nel presente articolo questi problemi vengono analizzati a partire da un’indagine di campo effettuata presso un importante museo italiano, con specifica attenzione alle condizioni microclimatiche all’interno di alcune sale espositive. Inoltre, viene discussa la possibilità di individuare un range di valori comuni dei parametri microclimatici atti a garantire sia i requisiti per la preservazione delle opere d’arte che quelli per il comfort degli occupanti.

### INTRODUZIONE

Le condizioni microclimatiche da mantenere all’interno degli ambienti museali, al fine di salvaguardare le opere d’arte, sono da tempo oggetto di studio e di ricerca. Poco attenzione è stata invece rivolta, sino ad ora, agli aspetti concernenti il comfort dei visitatori e delle persone che lavorano in tali ambienti. Peraltro, vengono utilizzati standard separati per i due tipi di requisiti.

In letteratura è possibile reperire numerose indicazioni sulle condizioni microclimatiche ottimali da garantire all’interno di spazi museali chiusi, al fine di preservare le opere d’arte ivi contenute ed esposte [1-9].

Anche le norme suggeriscono delle condizioni microclimatiche opportune per tali ambienti [10-14]. A tal proposito si ricorda che il Decreto Ministeriale del 10 maggio 2001 [15] ha reso cogente in Italia il mantenimento di determinate condizioni microclimatiche nei musei. Tra le altre indicazioni, la normativa di settore riporta alcuni campi limite di variazione dei parametri microclimatici caratteristici (temperatura dell’aria, umidità relativa, etc.), da garantire all’interno dei musei allo scopo di assicurare una corretta conservazione dei beni di interesse storico ed artistico.

Appare pertanto ragionevole assegnare ad un ambiente museale un livello di qualità legato alla percentuale del tempo in cui le sue condizioni microclimatiche si trovano all’interno dei citati campi di variazione. E’ con questo intento che, ad esempio, dalla normativa UNI 10829 [12] viene definito un “indicatore di scostamento”.

In questo lavoro si presentano i risultati di un’analisi di campo finalizzata alla valutazione delle condizioni microclimatiche vigenti in alcune sale espositive di un museo palermitano, la Galleria Regionale della Sicilia (noto anche come “Palazzo Abatellis”), che è caratterizzato dall’assenza di

impianti di climatizzazione in alcune delle principali espositive. Mediante l’impiego dell’indicatore di scostamento si proporrà di definire la qualità microclimatica indoor di alcune sale, nelle quali sono esposte opere di grande valore artistico.

Vengono inoltre esposte alcune considerazioni attinenti alla possibilità di assegnare alcuni valori limite ai parametri indoor, così da renderli contemporaneamente in grado di assicurare la corretta conservazione delle opere d’arte ed il benessere per i visitatori.

### DESCRIZIONE DEL MUSEO

La Galleria Regionale di Palazzo Abatellis è ubicata nel centro storico della città di Palermo, su un’arteria principale dell’antico quartiere della Kalsa (Figura 1), che registra il suo massimo sviluppo nel contesto urbanistico sullo scorcio del XV secolo, in virtù della sua vicinanza al porto [16].



Figura 1: La posizione di “Palazzo Abatellis” a Palermo

Gravemente danneggiato dai bombardamenti del 1943, l'edificio venne restaurato dall'architetto Carlo Scarpa, e divenne nel 1954 sede della Galleria Nazionale (ora Regionale) della Sicilia. In tale museo sono principalmente racchiuse collezioni di arte medievale ed opere che risalgono fino al settecento.

## DESCRIZIONE DELLE AREE MONITORATE

Il monitoraggio effettuato nell'arco di un anno (luglio 2001-luglio 2002), è stato indirizzato a tre ambienti del museo, contenenti le opere d'arte più note, costituite da materiali di diverso genere, per i quali la normativa vigente presenta prescrizioni differenti: l'affresco del "Trionfo della Morte", la "Anfora Malaga" in ceramica e, probabilmente l'opera più nota, il dipinto ad olio su tavola di legno, detto l'"Annunziata", di Antonello da Messina.

Come detto, il controllo ambientale dell'edificio e delle sale selezionate è quasi del tutto assente; pertanto il ruolo dell'involucro edilizio è fondamentale nella formazione del microclima interno al quale le opere sono sottoposte.

Di seguito si riportano alcune brevi descrizioni delle opere d'arte monitorate e della loro ubicazione all'interno del museo.

Trionfo della Morte (affresco). Il grande affresco (600 x 642 cm) del "Trionfo della Morte" (Figura 2) attualmente è collocato sotto la cupola del vano presbiterale di Palazzo Abatellis. Originariamente si trovava sul muro meridionale del cortile di Palazzo Sclafani a Palermo e successivamente staccato per i bombardamenti nel 1944.

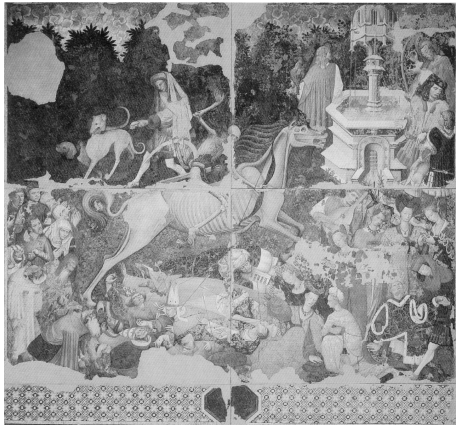


Figura 2: Trionfo della Morte

Anfora Malaga (ceramica). La grande anfora del tipo «Alhambra», dipinta a lustro metallico con grande iscrizione in caratteri cufici" dell'officina di Malaga, realizzata nel XIV secolo, è fra le ceramiche andaluse più note (Figura 3). Tale opera è posta nel portico nel supporto predisposto dall'architetto Scarpa e quindi, a differenza delle altre opere qui monitorate, si trova in un ambiente aperto.

Annunziata (olio su tavola di legno) La più importante opera d'arte, contenuta nella Galleria Regionale di Palazzo Abatellis, è la piccola tavola (45 x 34,5 cm) della "Annunziata", di Antonello da Messina (Figura 4), pervenuta al museo nel 1906. L'Annunziata, posizionata in una sala al primo piano del museo, è stata realizzata con olio su tavola da Antonello da Messina probabilmente quando si trovava a Venezia, nel 1474.

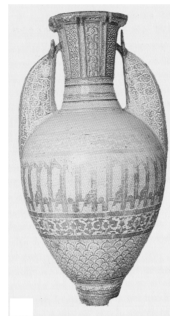


Figura 3: Anfora Malaga



Figura 4: Annunziata di Antonello da Messina

## RILIEVI DI TEMPERATURA ED UMIDITÀ RELATIVA

Il monitoraggio delle tre sale espositive di Palazzo Abatellis è stato effettuato nell'arco di un anno, dal luglio 2001 al luglio 2002, determinando gli andamenti di temperatura dell'aria e di umidità relativa all'interno delle sale. In dettaglio, sono state intraprese due modalità di osservazione delle condizioni termoigrometriche all'interno delle sale espositive considerate: la prima, per mezzo di rilievi istantanei, fornisce informazioni sulla distribuzione della temperatura e dell'umidità relativa all'interno dell'ambiente in un breve arco di tempo; la seconda fornisce invece informazioni sull'andamento temporale a lungo termine della temperatura e dell'umidità relativa, coinvolgendo, in tal modo, il comportamento energetico dell'edificio ospitante le opere d'arte. Di seguito, si riportano gli andamenti della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa riscontrati all'interno delle tre diverse sale monitorate, relativi alle due differenti modalità di monitoraggio.

### Rilievo istantaneo

Si tratta di un'analisi basata su rilievi spaziali effettuati nel più breve lasso di tempo (quasi istantanei), e che consente di ricavare le isolinee della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa [3]. Questa metodologia può essere utilizzata come strumento di diagnosi per dedurre utili informazioni sulla conservazione e la fruizione delle opere d'arte: le interazioni aria-superfici, le cause delle perturbazioni del microclima, i gradienti spaziali delle principali grandezze microclimatiche, gli scambi di calore, il flusso di massa d'aria, oltre ad alcuni meccanismi di deposito di sostanze deterioranti.

In dettaglio, le misure istantanee sono state eseguite durante una mattina di un giorno estivo di apertura del museo (10 luglio 2002), nella sala dov'è collocato l'affresco del Trionfo della Morte, seguendo le prescrizioni della normativa ISO 7726 [17]. Dalle misure effettuate sono stati ricavati i diagrammi intensimetrici ed isolivello, su una griglia con lati relativamente estesi, che rendono di facile lettura i fenomeni termoigrometrici che si verificano all'interno della sala. Nelle Figure 5 e 6 sono riportate rispettivamente la distribuzione spaziale della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa all'interno della sala del Trionfo della Morte.

Il monitoraggio istantaneo ha permesso di osservare fenomeni che non si sarebbero potuti individuare con il solo monitoraggio a lungo termine; tali fenomeni attengono più propriamente alle problematiche legate all'adeguatezza dell'ambiente in cui sono conservate le opere d'arte. Dalle precedenti figure, infatti, è possibile evidenziare due punti caratterizzati da bassi valori di temperatura e di umidità

relativa. Da alcune conversazioni intrattenute con il responsabile del museo, si è avuta la conferma che nel primo caso, immediatamente prima del periodo di monitoraggio, si era verificata la presenza di fenomeni di condensa o assorbimento capillare di acqua dal suolo. Per quanto riguarda, invece, il secondo punto, esso si trova in corrispondenza di una lastra forata nel pavimento, che costituisce una sorta di pozzo di calore oltre ad essere fonte di umidità.

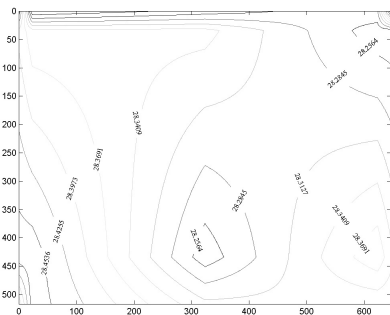


Figura 5: Distribuzione della temperatura dell'aria all'interno della sala del Trionfo della Morte.

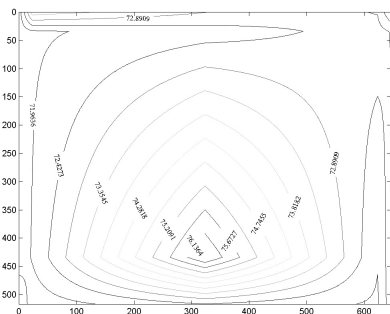


Figura 6: Distribuzione dell'umidità relativa all'interno della sala del Trionfo della Morte.

### Monitoraggio di lungo periodo

Il monitoraggio temporale delle condizioni ambientali all'interno delle sale espositive considerate è stato condotto con diverse campagne di misura, ognuna caratterizzata dall'utilizzo di differenti tipologie di strumentazione. La scelta della strumentazione è stata pensata in virtù delle due principali esigenze di un museo: la salvaguardia delle opere d'arte, per cui è stata utilizzata come riferimento la norma UNI 10829 del 1999 [12], ed il comfort dei fruitori del museo, per cui ci si riferisce alla seconda edizione della norma ISO 7726 del 1998 [17].

Le caratteristiche degli apparecchi di misurazione, secondo le norme UNI 10829 ed ISO 7726, vengono brevemente riportate in Tabella 1 e Tabella 2, rispettivamente.

Tabella 1: Caratteristiche della strumentazione per misure termoisometriche, secondo la Norma UNI 10829

Grandezza	Campo di misura	Accuratezza di misura
Temperatura	-20°C - 60°C	0,5 °C
Umidità dell'aria	10% - 90% (per t = 25°C)	2,5% (5% nel caso di igrometro a capello)

Tabella 2: Caratteristiche della strumentazione per misure termoisometriche, secondo la Norma ISO 7726/98

Grandezza	Campo di misura	Accuratezza di misura	Note
Temperatura	10°C - 40°C (classe C - Comfort)	richiesto $\pm 0,5^\circ\text{C}$ desiderato $\pm 0,2^\circ\text{C}$ (classe C - Comfort)	Questi livelli devono essere garantiti almeno per una deviazione $ t_r - t_a $ pari a 20°C
Umidità dell'aria	7% - 100% (classe C - Comfort)	richiesto $\pm 2\%$ (con $ t_a - t_r  \geq 10^\circ\text{C}$ )	Stimato dalle grandezze fornite dalla ISO 7726/98(E)

La strumentazione qui adoperata per eseguire il monitoraggio dei parametri microclimatici è consistita nel datalogger Hobo Pro della Onset Computer Corporation [18], che può immagazzinare in maniera digitale fino a 32.645 misure con un intervallo di campionamento variabile tra 0,5 secondi a 9 ore, così da permettere il monitoraggio anche per lunghi periodi di tempo.

L'intervallo di campionamento è stato fissato in 15 minuti, quale giusto compromesso tra le caratteristiche tecniche della strumentazione e le variazioni giornaliere dei parametri microclimatici presenti all'interno del museo.

Il prospetto "A" della normativa UNI 10829/99 [12] propone un intervallo consigliato di valori di temperatura ed umidità, in base al tipo di opera d'arte da conservare.

In Tabella 3 si riportano i valori di temperatura dell'aria e di umidità relativa, con riferimento alle opere monitorate, suggeriti sia dalla UNI 10829 che dal successivo Decreto Ministeriale del 10 maggio 2001.

Tabella 3: Valori limite di temperatura ed umidità relativa consigliati dalla normativa UNI 10829/99 e dal D.M. 10 maggio 2001

Bene di interesse storico ed artistico	UNI 10829		D.M. 10/05/01	
	Temperatura [°C]	Umidità [%]	Temperatura [°C]	Umidità [%]
Pitture su legno	19-24	50-60	19-24	45-65
Affreschi	10-24	55-65	6-25	45-60
Ceramiche	-	-	-	20-60

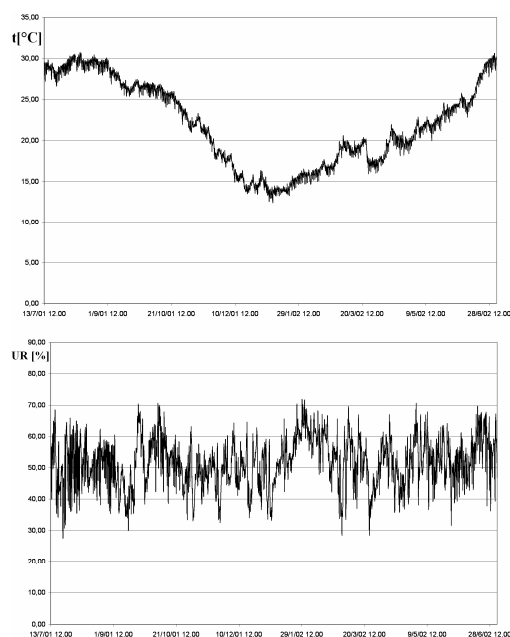


Figura 7: Andamento temporale dei valori di temperatura ed umidità relativa all'interno della sala dell'Annunziata.

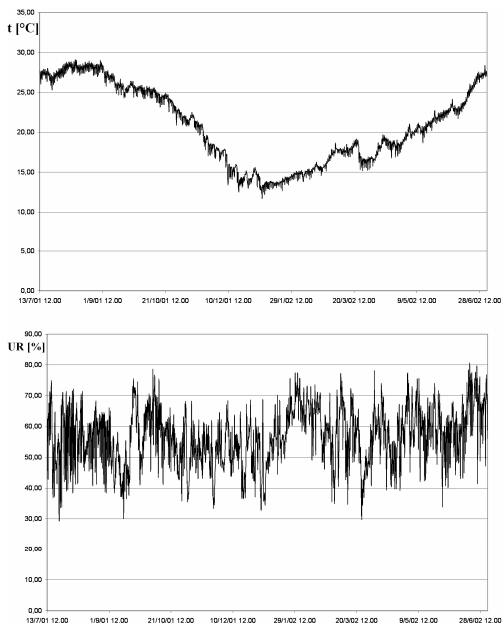


Figura 8: Andamento temporale dei valori di temperatura ed umidità relativa all'interno della sala del Trionfo della Morte

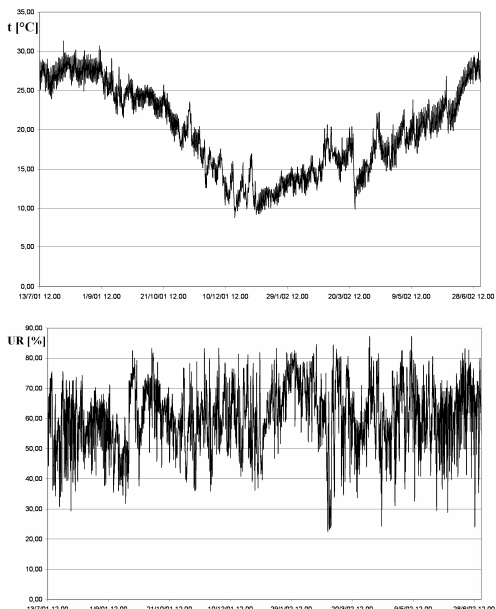


Figura 9: Andamento temporale dei valori di temperatura ed umidità relativa all'interno della sala dell'Anfora Malaga

Nelle Figure 7, 8 e 9 si riportano gli andamenti di temperatura dell'aria (diagramma in alto) ed umidità relativa (diagramma in basso) durante l'intera campagna di monitoraggio, rispettivamente per la sala dell'Annunziata, la sala del Trionfo della Morte e la sala dell'Anfora Malaga.

Tali dati di temperatura dell'aria e di umidità relativa sono stati successivamente rielaborati, per dedurne i valori orari da riportare su un diagramma psicrometrico, e per tracciare i diagrammi delle frequenze cumulate e ricavare gli indicatori proposti dalla normativa.

I diagrammi psicrometrici delle Figure 10, 11 e 12 forniscono un'immediata informazione sulle condizioni ambientali in cui si trovano le sale monitorate. Nei diagrammi è stata evidenziata la zona di sicurezza consigliata dalla normativa. In essi sono stati inoltre differenziati i valori per le diverse stagioni, per meglio individuare i periodi in cui eventualmente intervenire.

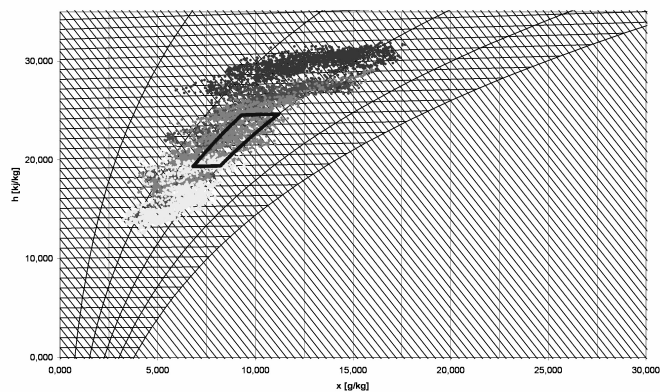


Figura 10: Condizioni ambientali all'interno della sala dell'Annunziata (punti chiari: estate; punti scuri: inverno)

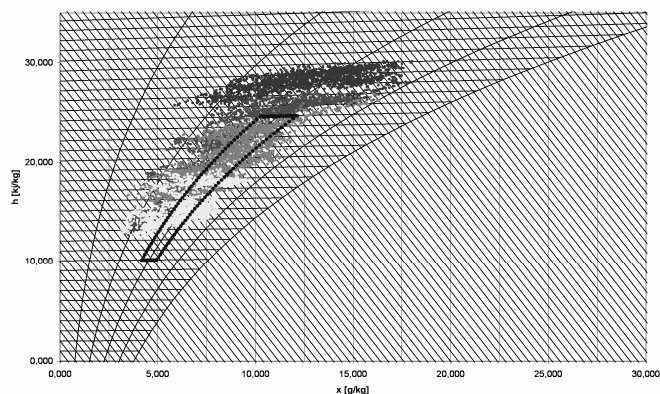


Figura 11: Condizioni ambientali all'interno della sala del Trionfo della Morte (punti chiari: estate; punti scuri: inverno)

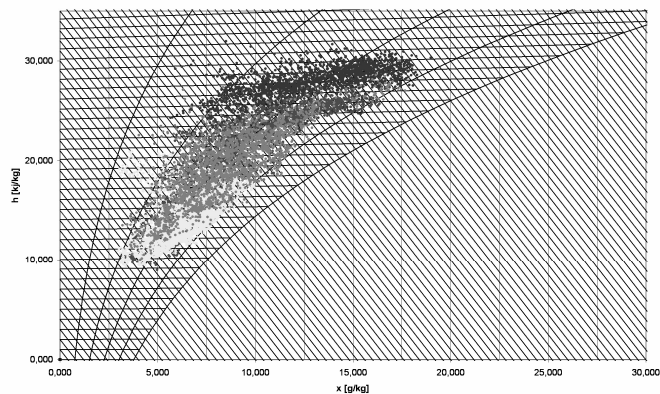


Figura 12: Condizioni ambientali all'interno della sala dell'Anfora Malaga (punti chiari: estate; punti scuri: inverno)

Le frequenze cumulate della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa, necessari per il calcolo degli indicatori di scostamento suggeriti dalla normativa, sono riportate nelle Figure 13 e 14 rispettivamente per la sala dell'Annunziata e la sala del Trionfo della Morte.

A partire da tali diagrammi, sono stati infine calcolati gli indicatori di scostamento. Tali indicatori, relativamente ad una determinata grandezza, sono definiti dalla UNI 10829 [12] come la percentuale di tempo in cui la grandezza in esame si mantiene al di fuori del campo prescelto e ritenuto accettabile.

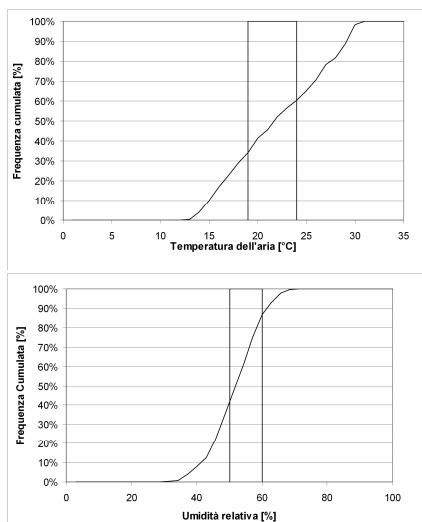


Figura 13: Frequenze cumulate della temperatura e dell'umidità relativa nella sala dell'Annunziata

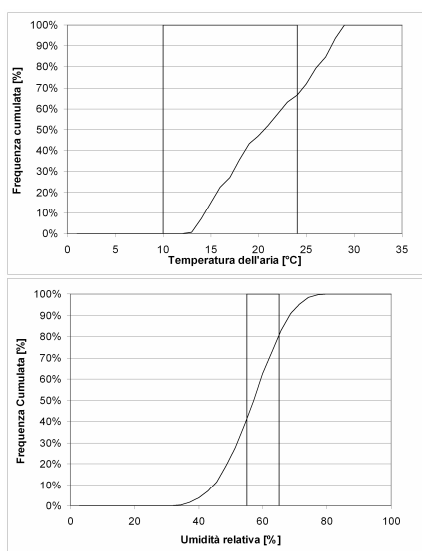


Figura 14: Frequenze cumulate della temperatura e dell'umidità relativa nella sala del Trionfo della Morte

Gli indicatori di scostamento utilizzati nel presente lavoro sono i seguenti:

a) IT, indicatore di scostamento - temperatura. Rappresenta la percentuale di tempo, ricavata dal diagramma della frequenza cumulata, dei valori orari di temperatura,  $\theta(t)$ , in cui essa si mantiene al di fuori del campo ritenuto accettabile.

b)  $IT_{24}$ , indicatore di scostamento - variazione di temperatura su 24 ore. Rappresenta la percentuale di tempo, ricavata dal diagramma della frequenza cumulata, dei valori dell'escursione giornaliera della temperatura,  $\Delta\theta_{24}$ , in cui essa supera il valore ritenuto accettabile.

c) IU, indicatore di scostamento - umidità relativa. Rappresenta la percentuale di tempo, ricavata dal diagramma della frequenza cumulata, dei valori orari di umidità relativa,  $U(t)$ , in cui essa si mantiene al di fuori del campo ritenuto accettabile.

d)  $IU_{24}$ , indicatore di scostamento - variazione di umidità relativa su 24 ore. Rappresenta la percentuale di tempo, ricavata dal diagramma della frequenza cumulata, dei valori dell'escursione giornaliera della umidità relativa,  $\Delta U_{24}$ , in cui essa supera il valore ritenuto accettabile.

In Tabella 4 si riportano i valori degli indicatori di scostamento ricavati per le sale analizzate.

Tabella 4: Valori degli indicatori di scostamento orari relativi alla campagna di monitoraggio

Opera	IT [%]		IU [%]	
	UNI 10829	D.M. 10/05/01	UNI 10829	D.M. 10/05/01
Annunziata	74,1	74,1	54,0	22,7
Trionfo della Morte	33,4	28,3	60,1	47,7
Anfora Malaga	NR	NR	NR	NR

La norma UNI 10829 [12], inoltre, suggerisce le massime escursioni giornaliere dei valori di temperatura ed umidità relativa che le diverse opere d'arte possono subire. In Tabella 5 si riportano, oltre ai valori delle massime escursioni giornaliere di temperatura ed umidità relativa, i valori degli indicatori di scostamento giornalieri.

Tabella 5: Valori degli indicatori di scostamento giornalieri per la campagna di monitoraggio

Opera	Max variazione temperatura [°C]	$IT_{24}$ [%]	Max variazione umidità [%]	$IU_{24}$ [%]
Annunziata	1,5	24,2	4	95,8
Trionfo della Morte	-	-	-	-
Anfora Malaga	-	-	10	93,3

## DISCUSSIONE

I risultati ottenuti con la campagna di monitoraggio, ed gli indicatori di scostamento calcolati, indicano che le opere analizzate sono esposte a sollecitazioni climatiche abbastanza severe, che potrebbero anche inficiare il loro stato di conservazione.

Esiste inoltre un limite strutturale degli indicatori qui presi in esame. Essi, infatti, registrano la percentuale del tempo durante il quale un'opera d'arte è teoricamente soggetta al rischio di aggressioni ambientali, ma nulla rivelano sull'entità delle grandezze climatiche cui un'opera d'arte è sottoposta. Così, secondo l'interpretazione suggerita da tali indicatori, sarebbe più nocivo il perdurare per lungo tempo della temperatura dell'aria ad un valore appena superiore a quello suggerito, piuttosto che il manifestarsi per un periodo più breve di valori di temperatura estremamente alti o estremamente bassi.

E' comunque del tutto ovvio che un microclima interno meno aggressivo non può che giovare allo stato di conservazione delle opere d'arte. Deve pertanto essere accentuato l'impegno verso l'adozione di opportune misure di mitigazione ambientale laddove i parametri climatici appaiano eccessivamente severi.

Va però ancora una volta sottolineato che i valori previsti dalla normativa sono semplicemente indicativi e non assoluti; infatti, essi dipendono non solo dal materiale costituente l'opera d'arte ma anche dalla storia climatica pregressa a cui l'opera d'arte è stata sottoposta.

## CONFRONTO CON I DATI PER IL COMFORT DELLE PERSONE

Le normative riguardanti le condizioni ambientali (principalmente termoigrometriche) da garantire all'interno dei musei per la salvaguardia delle opere d'arte trascurano le problematiche attinenti le opportune condizioni di comfort da garantire ai fruitori del museo nonché ai lavoratori.

Nel presente lavoro si vuole presentare un primo approccio a questa problematica, confrontando i valori limite di temperatura ed umidità da garantire sia per la salvaguardia delle opere d'arte sia per il comfort delle persone. A tal proposito si rappresenta in Figura 15 un digramma che riporta la zona comune per la quale le due differenti esigenze sono soddisfatte.

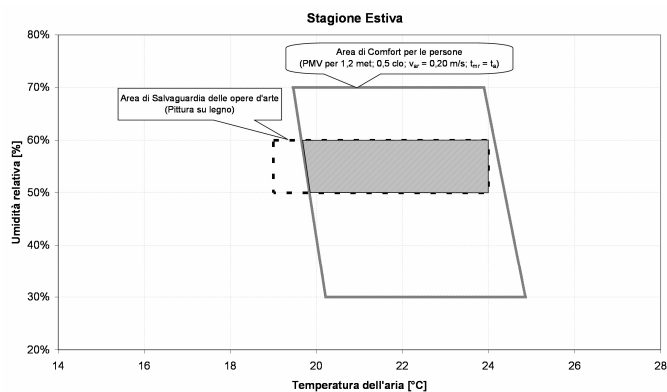


Figura 15: Condizioni microclimatiche comuni per la conservazione delle opere d'arte e per il comfort delle persone

## CONCLUSIONI

L'analisi di campo condotta nel museo di Palazzo Abatellis, che opera in regime di evoluzione climatica libera, ha evidenziato i rischi cui sono soggette le opere d'arte in esso esposte. Tali rischi vengono quantitativamente definiti per mezzo di alcuni indicatori proposti dalla normativa di settore vigente in Italia.

L'analisi del microclima interno ha inoltre evidenziato che solo occasionalmente i parametri indoor del museo sono in condizione di soddisfare contemporaneamente i requisiti di conservazione delle opere d'arte e di comfort per i visitatori e per coloro che lavorano nel museo.

Nel presente lavoro si propone l'adozione di una rappresentazione grafica che permette di evidenziare in maniera molto rapida ed efficace l'eventuale sussistenza di condizioni microclimatiche comuni alle due esigenze citate.

Rimane naturalmente il problema di intervenire con impianti che, da un lato, consentano di riportare i parametri indoor entro limiti accettabili e che, dall'altro, non producano un'alterazione significativa della resa visiva delle opere d'arte esposte.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. R.L. Feller, Accelerated Ageing Photochemical and Thermal Aspects. In: Berland D. editor. The J. Paul Getty Trust, 1994.
2. R. Arbizzani, U. Casellato, E. Fiorin, L. Nodari, U. Russo, P.A. Vigato, Decay markers for the preventative conservation and maintenance of paintings. *Journal of Cultural Heritage*, vol. 5, pp. 167–182, 2004.
3. D. Camuffo, Microclimate for cultural heritage. Elsevier, Amsterdam, 1998.
4. M. Cassar, Environmental Management – Guidelines for Museums and Galleries. Routledge, London & New York, 1995.
5. B. Appelbaum, Guide to environmental protection of collection. Connecticut: Sound View Press, Madison, 1991.
6. G. Thomson, The museum environment (2nd ed.). Butterworths, London, 1986.
7. P.D. Donovan, Protection of metals from corrosion in storage and transit. Ellis Horwood limited/Wiley, New York, 1986.
8. K.J. Macleod, Relative humidity: its importance, measurement and control in museums. *Technical Bulletin*, Canadian Conservation Institute, Ottawa, 1978.
9. G. Pavlogeorgatos, Environmental parameters in museum buildings. *Building and Environment*, vol. 38, pp. 1457-1462, 2003.
10. UNI 11120, Beni culturali – Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti. Milano: UNI – Ente Italiano di Unificazione, 2004.
11. UNI 10969, Beni culturali – Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni. Milano: UNI – Ente Italiano di Unificazione, 2002.
12. UNI 10829, Beni di interesse storico e artistico – Condizioni ambientali di conservazione – Misurazione ed analisi. Milano: UNI – Ente Italiano di Unificazione, 1999.
13. ISO 11799, Information and documentation – Document storage requirements for archive and library materials. Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
14. ANSI/NISO Z39.79, Environmental Conditions for Exhibiting Library and Archival Materials. Bethesda: American National Standards Institute/National Information Standards Organization, 2001.
15. D.M. 10 Maggio 2001. Atto di indirizzo sui criteri tecnico- scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei (Art. 150, comma 6, del D.Leg. n. 112 del 1998). *Gazzetta Ufficiale* 19 Ottobre 2001, n. 244.
16. G.C. Argan, V. Abbate, E. Battisti, Palazzo Abatellis, Novecento - Libreria dello Stato, Palermo, 1991.
17. ISO 7726, Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities, Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
18. S. Ogden, Preservation of library & archival materials: a manual (3th edition). Northeast Document Conservation Centre, Andover, Massachusetts, 1999.

## LA VALUTAZIONE ECONOMICA DELLE PRESTAZIONI TECNICHE DEI COMPONENTI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO: I SERRAMENTI

Lamberto Tronchin\*, Kristian Fabbri\*, Ilaria Durvilli\*, Valerio Tarabusi\*

\*Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale,  
Università degli Studi di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

### SOMMARIO

L'isolamento acustico e termico della facciata di un edificio dipende dalle prestazioni dei singoli elementi che la compongono. Le superfici vetrate, che costituiscono gli elementi "deboli" di una facciata, devono quindi essere oggetto di un attento studio per evitare di dare luogo a maggiori dispersioni termiche, ponti termici ed acustici.

Il DLgs del 19 agosto 2005 n° 192 "Attuazione della Direttiva 2002/91/Ce relativa al rendimento energetico nell'edilizia" con l'Allegato C fissa i valori della trasmittanza termica delle chiusure trasparenti, determinate in base alla Zona Climatica.

Per quanto concerne le prestazioni acustiche, il DPCM del 05/12/1997, "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici", definisce indici di valutazione misurati in opera come l'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione ( $D_{2m,nT,w}$ ), il cui valore, è influenzato dalla presenza di serramenti.

Il presente lavoro ha per oggetto lo studio delle prestazioni termiche ed acustiche dei serramenti, con riferimento ad un caso concreto di un edificio a schiera. Tale studio è condotto analizzando le prestazioni globali di quattro tipologie di serramenti, alla luce della UNI EN 12207 del 2000 e della UNI 11173 del 2005.

L'analisi si conclude valutando le prestazioni sotto il profilo dei costi energetici.

### INTRODUZIONE

Una corretta progettazione dell'involucro edilizio, alla luce del DLgs del 19 agosto 2005 "Attuazione della Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia" e del DPCM del 05/12/1997, "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici", deve coinvolgere una valutazione economica-prestazionale delle caratteristiche termofisiche ed acustiche dei singoli elementi che lo compongono.

In particolare i serramenti, che costituiscono gli elementi "deboli" dell'involucro, devono rispettare, dal 1/1/2006, i valori di trasmittanza termica per le chiusure trasparenti, compresi di infissi, in funzione della Zona Climatica, definiti nell'Allegato C del D.Lgs 192/05, il quale, introduce nuovi limiti più restrittivi a partire dal 1/1/2008 e successivamente dal 1/1/2010; mentre il DPCM del 05/12/1997 definisce un indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata,  $D_{2m,nT,w}$ , il cui valore è fortemente influenzato dalla presenza di serramenti, che molto spesso ne penalizzano l'efficienza.

Il presente lavoro ha per oggetto lo studio globale delle prestazioni termiche ed acustiche dei serramenti di un edificio a schiera, ad uso civile abitazione, di prossima realizzazione.

Secondo la norma UNI EN 12207 del 2000, che stabilisce cinque classi, 0, 1, 2, 3 e 4, di permeabilità all'aria (e sostituisce la UNI 7979 dove erano invece previste tre classi, A1, A2, A3 di permeabilità all'aria) e la UNI 11173 del 2005, si è condotto lo studio di quattro casi di serramenti analizzandone le prestazioni globali. La UNI 11173 del 2005 stabilisce, inoltre, le classi minime di permeabilità all'aria da rispettare in funzione di: zona di vento, altezza dell'edificio, zona climatica, classi di rugosità del terreno.

Secondo tale norma, i serramenti posti ad altezze minori di 10 m, appartengono automaticamente alla classe 0, non

doendo rispettare una classe di permeabilità all'aria specifica: nello studio condotto, essendo la villetta a schiera inferiore ai 10 m di altezza, si è esaminato il caso con permeabilità all'aria in Classe 0.

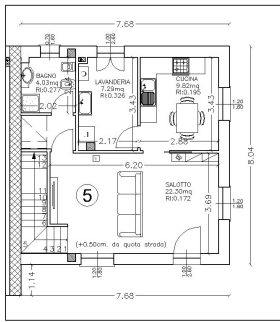


Figura 1: Configurazione planimetrica.

### CASO STUDIO

L'oggetto della simulazione è l'appartamento di testa di un edificio a schiera sito in località Lugo (RA) nel centro-nord Italia.

PIANTA PT



PIANTA 1P

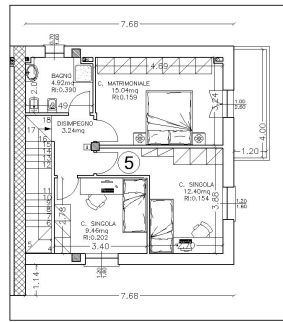


Figura 2: Piante di progetto PT-1P Caso Studio.

Il complesso edilizio è composto da cinque case a schiera con due livelli fuori terra, con la seguente tipologia costruttiva: telaio in cemento armato, solai in latero cemento e pareti di tamponamento del tipo a cassa vuota.

I pacchetti edilizi sono così costituiti:

- parete di tamponamento esterna spessore 29.5 cm (dall'interno verso l'esterno): 1.5 cm intonaco, 8 cm laterizio, 1.5 cm intonaco, 5 cm di isolante in lana di roccia, 12 cm laterizio, 1.5 cm intonaco;
- parete di tamponamento tra appartamenti sp. 41 cm (locali non riscaldati) composta da muratura di mattoni forati con intonacatura sulle due facce e isolante termoacustico fra gli appartamenti;
- solaio in laterocemento controterra con vespaio areato sp. 70 cm;
- solaio di copertura con tetto a falde in laterizio coibentato sp. 40.5 cm.

Le superfici vetrate studiate, sono state ipotizzate composte da un infisso in alluminio con battente a taglio termico e due tipologie di vetro:

- vetro Tipo 1: lastra stratificata 6 mm + 1.52 mm (PVB) + 4 mm;
- vetro Tipo 2: vetrocamera 8 mm + 12 mm (aria) + 8 mm.

Per ciascuna tipologia di vetro, poi, si sono considerate due diverse dimensioni di finestre e portefinestre per un totale di quattro casi esaminati (vedi Tabella 1):

Tabella 1: Trasmittanza termiche e Potere fonoisolante delle superfici vetrate studiate.

Caso	Serramento	Dimensioni [m <sup>2</sup> ]	U [W/m <sup>2</sup> K]	R' <sub>w</sub> [dB]
1.a	Finestra vetro Tipo 1	1.20 x 1.60	4.52	37
	Porta Finestra vetro Tipo 1	1.00 x 2.60	4.52	37
1.b	Finestra vetro Tipo 1	1.40 x 1.60	4.52	37
	Porta Finestra vetro Tipo 1	1.20 x 2.60	4.52	37
2.a	Finestra vetro Tipo 2	1.20 x 1.60	2.40	42
	Porta Finestra vetro Tipo 2	1.00 x 2.60	2.40	42
2.b	Finestra vetro Tipo 2	1.40 x 1.60	2.40	42
	Porta Finestra vetro Tipo 2	1.20 x 2.60	2.40	42

Le trasmittanza sono calcolate secondo la UNI 6949.

## SIMULAZIONE TERMICA

L'oggetto della simulazione prevede l'analisi di due tipologie di serramenti per due dimensioni di finestre e portefinestre, con infisso in alluminio con battente a taglio termico ( $U = 2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ):

- Caso 1.a: dimensioni delle finestre, 1.20 m x 1.60 m, e portefinestre, 1.00 m x 2.60 m, come da progetto, con serramento in alluminio e vetro tipo 1;
- Caso 1.b: dimensioni delle finestre, 1.40 m x 1.60 m, e portafinestre, 1.20 m x 2.60 m, aumentate in larghezza di 20 cm rispetto al progetto, con serramento in alluminio e vetro tipo 1;
- Caso 2.a: dimensioni delle finestre, 1.20 m x 1.60 m, e portefinestre, 1.00 m x 2.60 m, come da progetto, con serramento in alluminio e vetro tipo 2;
- Caso 2.b: dimensioni delle finestre, 1.40 m x 1.60 m, e portafinestre, 1.20 m x 2.60 m, aumentate in larghezza di 20 cm rispetto al progetto, con serramento in alluminio e vetro tipo 2.

Ai fini della verifica termica, sono state calcolate le superfici vetrate e opache disperdenti dell'involucro edilizio (vedi Tabella 2), impiegando, per i singoli pacchetti strutturali, le seguenti trasmittanze termiche:

- parete di tamponamento esterna con trasmittanza globale pari a  $U = 0.59 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- solaio in laterocemento controterra con vespaio areato  $U = 1.06 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;
- solaio di copertura con tetto a falde in laterizio coibentato  $U = 0.68 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Tabella 2: Calcolo Superfici opache e vetrate

Descrizione	Sup.Caso1 [m <sup>2</sup> ]	Sup.Caso2 [m <sup>2</sup> ]	Volume [m <sup>3</sup> ]	S/V [m <sup>-1</sup> ]
Parete Nord-Est	42.38	41.86	384.31	0.78
Parete Sud-Est	41.30	39.55	384.31	0.78
Parete Sud-Ovest	43.90	43.26	384.31	0.78
Parete locale non riscaldato	49.91	49.91	384.31	0.78
Tot.Sup.verticali disperdenti	127.58	124.67	384.31	0.78
Superficie finestrata	21.24	25.04	384.31	0.78
% superficie finestrata	16.65 %	20.08 %	384.31	0.78

## Il software-termico

Ai fini della simulazione e calcolo delle dispersioni durante il regime invernale e del fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale è stato utilizzato il software BestClass, sviluppato dal tavolo Energia della Provincia di Milano e dal Dipartimento "Best" del Politecnico di Milano. Il modello di calcolo del software BestClass è la Raccomandazione CTI R03/3 derivato dalla norma UNI 832 e prevede il calcolo in regime statico delle dispersioni termiche dell'involucro edilizio con maggiorazioni legate all'orientamento delle superfici e al regime di funzionamento dell'impianto.

Per valutare il comportamento termico dell'edificio, per le

superfici opache e vetrate, sono stati considerate:

- le dispersioni energetiche per trasmissione [kWh/anno];
- gli apporti solari delle superfici trasparenti [kWh/anno];
- il fabbisogno energetico dell'involucro [kWh/anno];
- il fabbisogno di climatizzazione invernale [kWh/anno];
- il fabbisogno di energia primaria specifico [kWh/m<sup>2</sup>anno];

così come risultanti dalle simulazioni con il software BestClass (vedi Tabelle 3 e 4).

Tabella 3: Risultati simulazioni comportamento termico dell'edificio espressi in kWh.

CASI SIMULAZIONE	Caso 1a	Caso 1b	Caso 2a	Caso 2b
En.trasmissione [kWh/anno]	16.018	16.716	13.869	14.228
En.apporti solari sup.trasparenti [kWh/anno]	183	219	183	219
Fabb.Energetico Involucro [kWh/anno]	17.825	18.190	15.378	15.707
Fabb.Specifico Involucro [kWh/m <sup>2</sup> anno]	157	163	138	141
Fabb.En.Primaria Climatizzazione invernale [kWh/anno]	19.293	20.022	16.926	17.288
Fabb.En.Primaria specifico Climatizzazione invernale [kWh/m <sup>2</sup> anno]	173	179	152	155

Tabella 4: Risultati simulazioni comportamento termico dell'edificio espressi in percentuale.

CASI SIMULAZIONE	Caso 1.a	Caso 1.b	Caso 2.a	Caso 2.b
En.trasmissione [kWh/anno]	0.00%	4.36%	13.42%	11.17%
En.apporti solari sup.trasparenti [kWh/anno]	0.00%	196.7%	0.00%	19.67%
Fabb.Energetico Involucro [kWh/anno]	0.00%	2.05%	13.73%	11.88%
Fabb.Specifico Involucro [kWh/m2anno]	0.00%	3.78%	12.27%	10.39%
Fabb.En.Primaria Climatizzazione invernale [kWh/anno]	0.00%	3.78%	12.27%	10.39%
Fabb.En.Primaria specifico Climatizzazione invernale [kWh/m2 anno]	0.00%	3.78%	12.24%	10.39%

#### Commento dei risultati della simulazione termica

Dalle simulazioni del comportamento termico dell'involucro si può notare che:

per quel che riguarda i parametri termofisici:

- al diminuire della trasmittanza dei serramenti (vedi caso 1 e caso 2) sia ha una riduzione del fabbisogno energetico dell'involucro del 13,7% per il caso 2.a e del 11,9% per il caso 2.b;
- per quel che riguarda la variazione delle dimensioni dei

serramenti:

- non incide in maniera significativa sugli apporti energetici solari (36 kWh/anno casi 1.b-2.b) ;
- all'aumentare delle superfici trasparenti diminuisce la dispersione termica dell'involucro, perché compensate dai maggiori apporti solari, benché minimi;

per quel che riguarda la relazione tra variazione della trasmittanza e variazione della superficie trasparente:

- l'elemento determinante per ridurre il fabbisogno energetico dell'involucro è la trasmittanza, vedi la variazione tra i casi 1 e i casi 2 (vedi tabella 4).

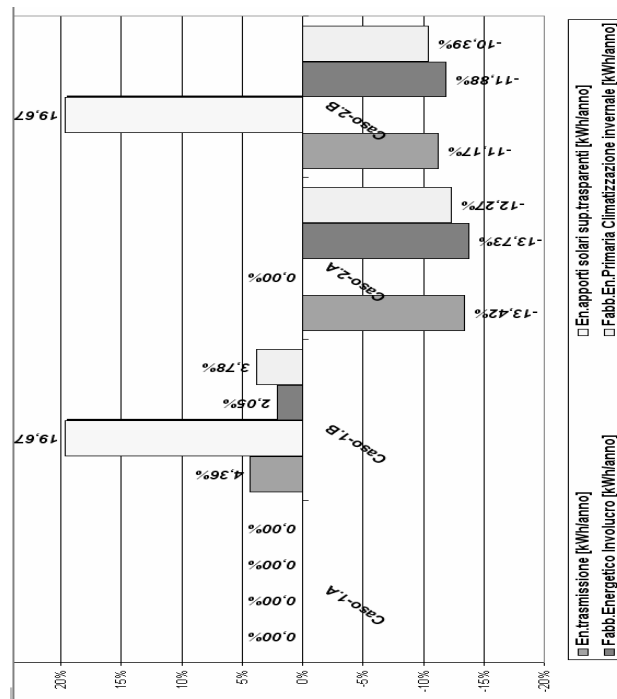


Figura 3: Grafico delle variazioni percentuali rispetto la configurazione del caso 1.a presa come riferimento.

#### SIMULAZIONE ACUSTICA

Nella simulazione acustica, come nel caso di quella termica, sono state prese in esame le quattro casistiche che derivano dal considerare due tipologie di serramenti per due dimensioni di finestre e portefinestre, con infisso in alluminio e battente a taglio termico: Caso 1.a, Caso 1.b, Caso 2.a, Caso 2.b.

Nello svolgimento del calcolo acustico, sono stati considerati, per ciascun elemento di facciata, i seguenti indici di valutazione del potere fonoisolante apparente  $R'_w$ :

- parete di tamponamento esterna, come da certificazione di laboratorio ( $R_w = 57$ ):  $R'_w = 54$  dB,  $m = 250$  Kg/m<sup>2</sup>;
- finestre (Caso 1.a:1.2 x 1.6, Caso 1.b: 1.4 x 1.6) e portefinestre (Caso 1.a:1 x 2.6, Caso 1.b: 1.2 x 2.6) con serramento in alluminio e vetro tipo 1:  $R'_w = 37$  dB,  $m' = 25$  Kg/m<sup>2</sup> ;
- finestre (Caso 2.a:1.2 x 1.6, Caso 2.b: 1.4 x 1.6) e portefinestre (Caso 2.a:1 x 2.6, Caso 2.b: 1.2 x 2.6) con serramento in alluminio e vetro tipo 2:  $R'_w = 42$  dB,  $m' = 46$  Kg/m<sup>2</sup>.

Per analizzare la modifica del potere fonoisolante apparente di facciata al variare delle dimensioni e delle tipologie di serramenti, per ogni ambiente sono stati calcolati:

- volume interno [m<sup>3</sup>];
- superficie interna della facciata confinante con l'esterno [m<sup>2</sup>];
- superficie interna della facciata confinante con l'esterno al netto delle bucatore [m<sup>2</sup>];
- superfici vetrate [m<sup>2</sup>], calcolate per ogni caso.

### Il software-acustico

Per eseguire la simulazione acustica ed il relativo calcolo dell'indice di isolamento acustico standardizzato di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione,  $D_{2mnTw}$ , è stato utilizzato il software Echo, realizzato da TEP S.r.l. per ANIT, per la verifica delle caratteristiche acustiche degli edifici. Il modello di calcolo del software Echo consente di verificare la rispondenza dei requisiti acustici passivi con le prescrizioni definite nel D.P.C.M. 5/12/1997.

L'isolamento acustico di facciata, che descrive le prestazioni acustiche dell'edificio al rumore aereo proveniente dall'esterno, fornisce una grandezza direttamente misurabile sul livello di prestazione di isolamento in funzione del tipo di sorgente sonora esterna.

Si è proceduto con il calcolo dell'isolamento acustico di facciata per ogni ambiente della casa a schiera, per valutare in quali stanze e con quali tipologie e dimensioni di serramenti, fosse rispettato il limite minimo di 40 dB fissato dal DPCM del 5/12/1997.

In questa prima fase, si è optato di utilizzare una tabella di calcolo excel, in quanto, Echo, non fornendo valori decimali, non permette di verificare la variazione dell'indice di isolamento acustico  $D_{2mnTw}$ , al variare delle tipologie dei serramenti. Il calcolo è stato condotto applicando le Equazioni (1) e (2):

$$R' = -10 \log \left[ \sum \frac{S_i}{S} 10^{-R_i/10} + \frac{A_0}{S} \sum 10^{-D_{n,e,i}/10} \right] - C_l \quad (1)$$

$$D_{2mnTw} = R' + 10 \log \left( \frac{V}{6T_o S} \right) \quad (2)$$

Gli ambienti più sfavoriti sono risultati il soggiorno e la lavanderia (Tabella 5):

Tabella 5: Calcolo  $D_{2mnTw}$  ambienti soggiorno-lavanderia - Excel -

Descrizione	Caso 1.a Classe0	Caso 1.b Classe0	Caso 2.a Classe0	Caso 2.b Classe0	DPCM 5/12/1997 [Db]
Soggiorno	42.5	41.8	46.9	46.3	40
Lavanderia	41	40.3	45.8	45.1	40

Sono stati valutati i valori riferiti al soggiorno e alla lavanderia perché nel primo caso (soggiorno) si tratta dell'ambiente con maggiore superficie finestrata, mentre nel secondo caso (lavanderia) si tratta dell'unico ambiente dove nel caso 1.b si raggiunge il limite di normativa, a motivo del rapporto tra superficie opaca e trasparente di circa uno a uno.

Allo scopo di confrontare le prestazioni acustiche con quelle termiche, eseguendo la simulazione con il software Echo, si è esteso il calcolo dell'isolamento acustico alle intere facciate che delimitano l'involucro, ponendosi in classe 0 di permeabilità all'aria (vedi Tabelle 6,7,8,9).

Tabella 6: Caso 1.a - Calcolo  $D_{2mnTw}$  - ECHO -

Descrizione	Sup. opaca [m <sup>2</sup> ]	Sup. vetrata [m <sup>2</sup> ]	$D_{2mnTw}$ ECHO [Db]	DPCM 5/12/1997 [Db]
Facciata S-O	37.97	6.44	45	40
Facciata S-E	30.58	8.36	44	40
Facciata N-E	39.57	4.84	46	40

Tabella 7: Caso 1.b - Calcolo  $D_{2mnTw}$  - ECHO -

Descrizione	Sup. opaca [m <sup>2</sup> ]	Sup. vetrata [m <sup>2</sup> ]	$D_{2mnTw}$ ECHO [Db]	DPCM 5/12/1997 [Db]
Facciata S-O	36.81	7.60	44	40
Facciata S-E	29.1	9.84	43	40
Facciata N-E	39.05	5.36	45	40

Tabella 8: Caso 2.a - Calcolo  $D_{2mnTw}$  - ECHO -

Descrizione	Sup. opaca [m <sup>2</sup> ]	Sup. vetrata [m <sup>2</sup> ]	$D_{2mnTw}$ ECHO [Db]	DPCM 5/12/1997 [Db]
Facciata S-O	37.97	6.44	49	40
Facciata S-E	30.58	8.36	48	40
Facciata N-E	39.57	4.84	50	40

Tabella 9: Caso 2.b - Calcolo  $D_{2mnTw}$  - ECHO -

Descrizione	Sup. opaca [m <sup>2</sup> ]	Sup. vetrata [m <sup>2</sup> ]	$D_{2mnTw}$ ECHO [Db]	DPCM 5/12/1997 [Db]
Facciata S-O	36.81	7.60	48	40
Facciata S-E	29.1	9.84	47	40
Facciata N-E	39.05	5.36	49	40

Tabella 10: Risultati simulazioni comportamento acustico dell'involucro espressi in percentuale.

Descrizione	Caso 1.a Classe0 $D_{2mnTw}$ %	Caso 1.b Classe0 $D_{2mnTw}$ %	Caso 2.a Classe0 $D_{2mnTw}$ %	Caso 2.b Classe0 $D_{2mnTw}$ %
Facciata S-O	0,00%	-2,22%	8,89%	6,67%
Facciata S-E	0,00%	-2,27%	9,09%	6,82%
Facciata N-E	0,00%	-2,17%	8,70%	6,53%

### Commento dei risultati simulazione acustica

Dalle simulazioni del comportamento acustico dell'involucro (figura 4) si può notare che:

- per quel che riguarda l'isolamento acustico di facciata:
  - a parità di  $R'_w$  e di superficie della componente opaca, casi 1.a - 2.a e casi 1.b - 2.b all'aumentare di  $R'_w$  dei serramenti aumenta l'isolamento acustico di facciata di 4 dB (vedi Tabella 6 e 8 - Tabelle 7 e 9);
  - per quel che riguarda la variazione delle dimensioni dei

serramenti:

- a parità di  $R'_w$  di ciascuna tipologia di serramento, casi 1.a - 1.b e casi 2.a - 2.b, all'aumentare della superficie vetrata diminuisce l'indice di isolamento acustico di facciata di 1 dB (vedi Tabelle 6 e 7 - tabelle 8 e 9);  
-per quel che riguarda la relazione tra variazione percentuale dell'isolamento acustico di facciata di ciascuna superficie esterna dell'involucro e la relativa variazione della superficie trasparente:
- la variazione di superficie trasparente dei serramenti presenti in facciata incide in minima parte, in media del 2.2%, sulla variazione dell'isolamento acustico di facciata (vedi confronto tra il caso 1.a con 1.b e il caso 2.a con 2.b, tabella 10):
- l'elemento che influisce in modo determinante sull'aumento dell'isolamento acustico di facciata è il potere fonoisolante dei componenti vetrati, con un incremento medio del 8.9% nel caso 2.a e del 6.7% nel caso 2.b rispetto al caso 1.a, preso come riferimento (vedi la variazione percentuale tra i casi 1 e i casi 2, tabella 10);
- la facciata con la migliore prestazione dal punto di vista dell'isolamento acustico è la facciata NORD-EST, in quanto presenta un numero inferiore di serramenti rispetto agli altri prospetti.

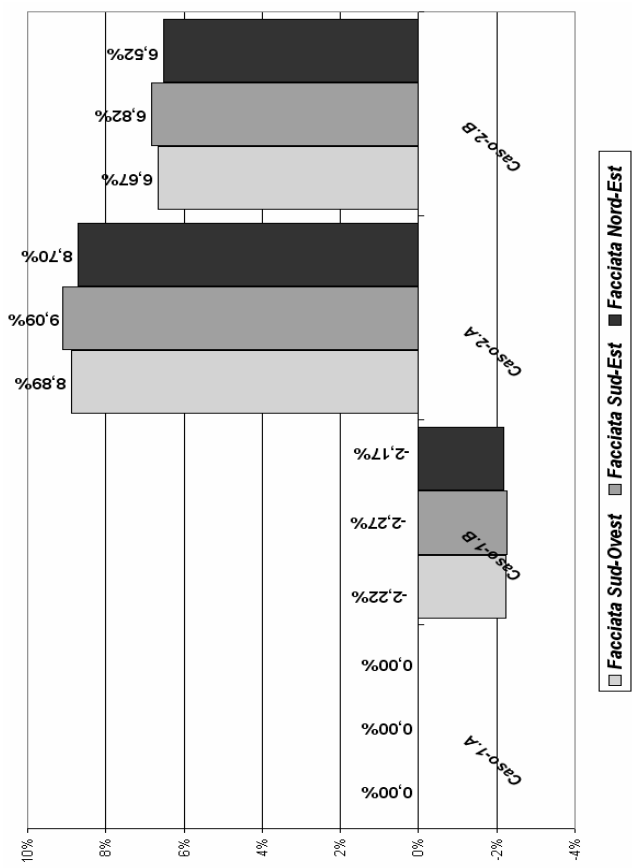


Figura 4: Grafico delle variazioni percentuali rispetto la configurazione del caso 1.a presa come riferimento.

### COSTI ENERGETICI

A corollario delle simulazioni termiche ed acustiche sono state eseguite delle verifiche dei costi economici per la climatizzazione invernale, legati alle caratteristiche

energetiche del fabbricato, per i quattro casi studio.

Per la valutazione dei costi energetici ci si è riferiti al costo della bolletta energetica, ovvero al costo dei metri cubi di gas consumati in base al fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale.

Per la determinazione dei costi si è preso come riferimento la tariffa economica in €/mc di gas naturale per la località Lugo, fornita da Hera srl azienda distributrice del gas naturale di zona. Il costo tariffario è pari a 0,63 €/mc di gas metano, al lordo delle imposte, con un potere calorifico superiore pari a 37,56 MJ/mc.

Dai dati della simulazione termica espressi in kWh/anno e dalla tariffa energetica si sono calcolati i costi annuali della spesa per la climatizzazione invernale espressi in €/anno.

### Commento dei risultati simulazione dei costi energetici

- Dalle simulazioni dei costi energetici si può notare che:
- all'aumentare delle dimensioni dei serramenti le dispersioni aumentano ed aumentano i costi energetici,
  - al diminuire della trasmittanza diminuiscono sensibilmente i costi energetici.

In conclusione si può affermare che l'elemento determinante per ridurre i costi energetici è la trasmittanza dei serramenti, dato che tra i casi 1 e i casi 2 la variazione dovuta alla riduzione della trasmittanza è di almeno il 10% (vedi figure 5 e 6).

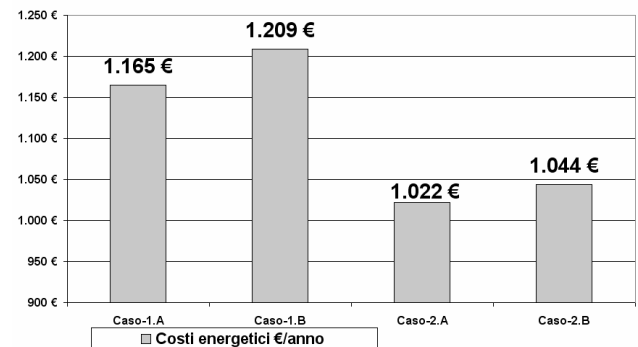


Figura 5: Costi energetici espressi in €/anno

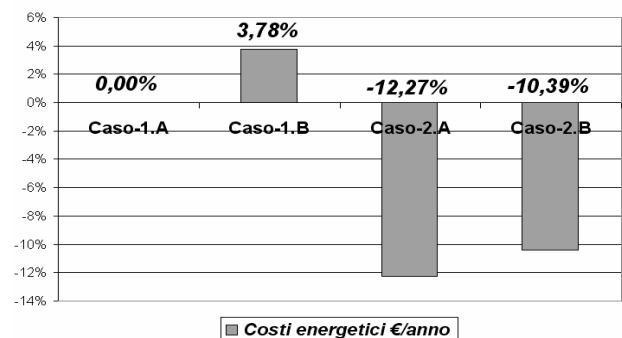


Figura 6: Grafico delle variazioni percentuali rispetto la configurazione del caso 1.a presa come riferimento.

### CONSIDERAZIONI FINALI

Dalle simulazioni si evidenzia chiaramente che il serramento costituisce l'elemento debole dell'involucro edilizio, sia per

l'aspetto termico che per quello acustico, e che la trasmittanza termica e l'indice del potere fonoisolante apparente determinano la performance del serramento. Per questa ragione le maggiori differenze si hanno tra i casi 1 ed i casi 2, con la maggiore variazione tra il caso base 1.a e il caso 2.a. (vedi figura 7).

Al migliorare di una delle due prestazioni, termiche o acustiche, diminuiscono anche i costi energetici.

I provvedimenti legislativi e normativi che si occupano delle prestazioni termiche, acustiche e luminose dell'involucro edilizio e degli edifici normano distintamente ogni singolo requisito cogente: dalle simulazioni è possibile affermare che esistono delle relazioni che legano i parametri dimensionali, termici ed acustici del serramento.

Al fine di soddisfare i requisiti del benessere luminoso, termico e acustico degli ambienti, il miglioramento delle prestazioni, anche di uno solo di questi parametri che caratterizzano il serramento, produce un maggiore comfort interno.

Resta da studiare quali sono i parametri minimi e le relazioni tra le prestazioni del serramento, al fine di soddisfare i diversi provvedimenti legislativi e normativi.

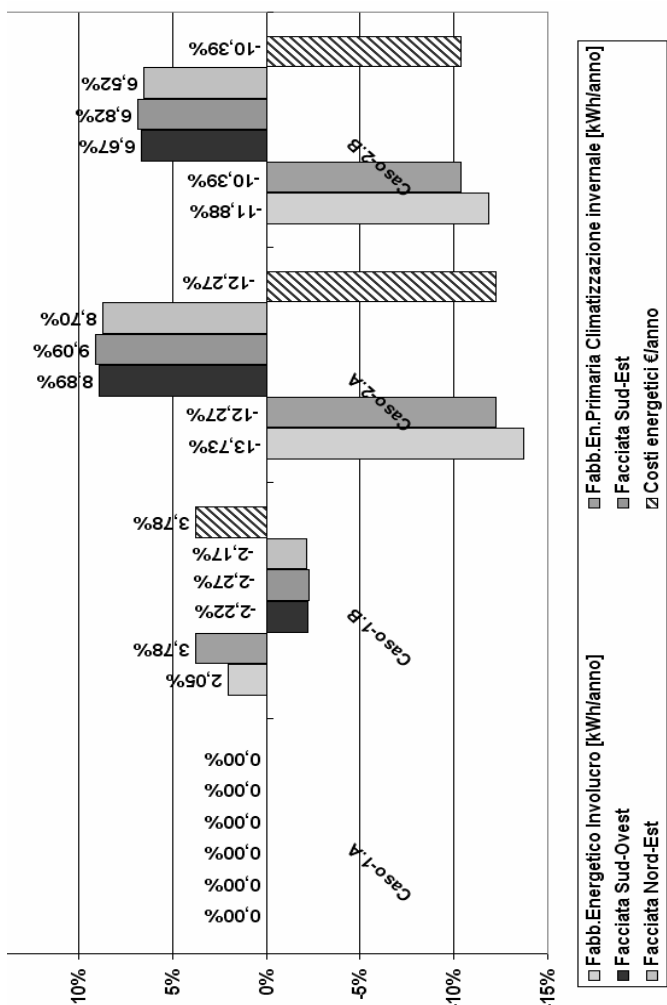


Figura 7: Grafico delle variazioni percentuali di tutti i parametri termici, acustici ed energetici, rispetto la configurazione del caso 1.a presa come riferimento.

## NOMENCLATURA

Simbolo	Descrizione	Unità di misura
U	Trasmittanza	[W/m <sup>2</sup> K]
R' <sub>w</sub>	Indice di valutazione del potere fonoisolante apparente	[dB]
m'	Massa superficiale	[Kg/m <sup>2</sup> ]
D <sub>2m,nT,w</sub>	Indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato al T <sub>w</sub>	[dB]
R'	Potere fonoisolante apparente di facciata	[dB]
R <sub>i</sub>	Potere fonoisolante dell'elemento normale di facciata i	[dB]
S	Superficie complessiva della facciata	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>i</sub>	Superficie dell'elemento normale di facciata i	[m <sup>2</sup> ]
T <sub>0</sub>	Tempo di riverberazione di riferimento (0,5 s)	[s]
D <sub>n,e,i</sub>	Isolamento acustico normalizzato del piccolo elemento di facciata i	[dB]
V	Volume dell'ambiente ricevente	[m <sup>3</sup> ]
A <sub>0</sub>	Area equivalente di assorbimento acustico di riferimento pari a 10 m <sup>2</sup>	[m <sup>2</sup> ]
C <sub>1</sub>	Correzione relativa al contributo globale della trasmissione laterale	[dB]

## BIBLIOGRAFIA

1. European Directive 2002/91/Ce "Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the council of 16 december 2002 on the energy performance of buildings"
2. Decreto Legislativo 19 Agosto 2005 n.192 "Attuazione della Direttiva 2002/91/Ce relativa al rendimento energetico nell'edilizia"
3. DPCM 5 dicembre 1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici" (G.U.n.°297 del 22/12/97)
4. Raccomandazioni CTI R03/3 "Prestazioni Energetiche degli edifici. Climatizzazione invernale e preparazione acqua calda per usi igienici sanitari"
5. UNI EN 832 "Thermal Performance of Buildings – Calculation of Energy Use for Heating residential buildings"
6. UNI EN ISO 140-5:2000 "Parte 5-Misurazioni in opera dell'isolamento acustico degli elementi di facciata e delle facciate"
7. UNI 11173 "Criteri di scelta in base alla permeabilità all'aria, tenuta all'acqua, resistenza al vento, trasmittanza termica ed isolamento acustico"
8. UNI EN 12207: 2000 " Permeabilità all'aria – Classificazione"
9. UNI EN ISO 6969 "Componenti e elementi per edilizia-resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo"
10. Depliant tecnico Rockwool "Acustica in edilizia" Rockwool Italia spa Milano
11. Procedure operative "BestClass" Tavolo Energia & Ambiente Provincia di Milano.
12. Software ECHO 4.0 Verifica dei requisiti acustici passivi degli edifici ANIT
13. Software BestClass Certificazione energetica degli edifici versione BETA1.02 Sacert

## UTILIZZAZIONE DI SISTEMI DI CLIMATIZZAZIONE ELIO-ASSISTITI IN POLI DIDATTICI UNIVERSITARI

Alessandro Franco, Fabio Fantozzi

Dipartimento di Energetica “L. Poggi”  
Università di Pisa  
Via Diotisalvi, 2 – 56126 PISA

### SOMMARIO

Il lavoro, dopo aver delineato il ritorno di interesse per l'uso dell'energia solare per il raffrescamento di edifici e le difficoltà nel giustificare l'utilizzazione solo sulla base di una convenienza economica, cerca di analizzare in maniera più precisa il problema. Dopo aver analizzato i metodi per la valutazione dell'energia radiante e degli apporti termici sugli edifici, si analizzano i modelli per poter simulare il comportamento degli edifici in transitorio e gli effetti di sfasamento legati alla tipologia di involucro edilizio. Dopo aver delineato la strategia generale la progettazione di sistemi di climatizzazione elio-assistiti, viene analizzato un possibile caso test, rappresentato da un edificio in fase di ristrutturazione presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa. Vengono infine riportate alcune conclusioni nelle quali si mette in evidenza come l'utilizzazione di sistemi di climatizzazione elio-assistiti, fatta salva l'ottimizzazione delle macchine e dei sistemi, debba passare necessariamente attraverso una revisione delle metodologie progettuali che tendano a ridare valore ad alcuni aspetti talvolta considerati marginali nella progettazione di impianti convenzionali.

### INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'impiantistica si sta diffondendo l'idea di poter utilizzare sistemi che facciano ricorso attivo alla energia solare per coprire le esigenze legate alla climatizzazione estiva così da estendere l'utilizzo di questa importante forma di energia rinnovabile sia per soddisfare più compiutamente il problema di ridurre i consumi energetici sia per la prospettiva di poter contribuire ad un contenimento complessivo delle emissioni di gas clima-alteranti. [1-2]. L'idea generale non sempre ha dato origine a soluzioni impiantistiche valide.

La domanda di condizionamento estivo è in rapido aumento, perché sono richieste condizioni di comfort più elevate, per l'aumento delle temperature medie estive ed anche perché le tecniche passive impiegate in passato non sembrano essere particolarmente presenti nella più recente pratica edilizia.

L'uso crescente di impianti di condizionamento con macchine frigorifere a compressione alimentate ad energia elettrica è altresì causa dell'aumento del picco di potenza elettrica in estate, che, in numerosi casi, ha portato al raggiungimento della capacità limite delle reti.

Tra i sistemi di refrigerazione che si prestano all'impiego di energia solare sono di particolare interesse sia i tradizionali sistemi ad assorbimento che utilizzano le classiche miscele acqua - bromuro di litio o acqua - ammoniacale nei quali l'energia solare può essere utilizzata per fornire il calore per la separazione dell'assorbente dal refrigerante sia quelli più innovativi a adsorbimento, che utilizzano soluzioni impiantistiche e materiali meno tradizionali (miscele di sali, gel di silice, carboni attivi, ecc.) e sono caratterizzati da funzionamenti periodici. L'utilizzazione di tali sistemi, pur se interessante in linea di principio e spinta dall'ondata emozionale legata ad un rinnovato interesse verso l'uso di fonti di energia rinnovabili, mostra tutti i suoi limiti nel caso in

cui questi siano pensati nell'ambito di logiche progettuali solitamente utilizzate per gli impianti tradizionali.

A seguito dell'obbligo imposto dalla normativa nazionale sull'uso di energie rinnovabili o assimilate nell'edilizia pubblica o adibita ad uso pubblico, un campo in cui tali sistemi potrebbero trovare un interessante impiego e contribuire ad un risparmio significativo di energia primaria (combustibili fossili ed energia elettrica), è quello di edifici universitari tipo poli didattici o aule studio, talvolta dislocati in posizione periferica rispetto agli edifici centrali, utilizzati in modo molto intenso su circa dodici ore giornaliere. Questi richiedono la presenza di impianti di climatizzazione specifici che, per effetto delle difficoltà di una corretta gestione e delle forti disomogeneità di utilizzazione, sono veri e propri “pozzi” di consumo energetico.

Una proficua utilizzazione di sistemi di climatizzazione elio-assistiti richiede tuttavia una attenta progettazione (effettuata tenendo conto in particolare delle condizioni non-stazionarie!) del sistema edificio-impianto-collettori solari, che comporta una valutazione molto attenta sia degli apporti termici di energia solare sia della possibilità di utilizzare in maniera favorevole gli effetti inerziali, legati alla struttura ed alle proprietà termofisiche dei materiali che la costituiscono.

E' a tale scopo importante lo sviluppo di modelli previsionali sia della radiazione solare incidente, sia del comportamento del sistema edificio, di natura più complessa rispetto a quelli previsti dalle vigenti normative che pure hanno il merito di aver introdotto il problema [3-5] ed una analisi di quei sistemi che potrebbero essere utilizzati per l'utilizzazione dell'energia solare nel campo della climatizzazione estiva. Tutto questo evidenziando che, laddove si preveda l'utilizzazione dell'energia solare, è bene prevedere la possibilità di una completa autosufficienza dell'impianto, pena lo scarso significato energetico degli interventi.

## 1. UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA SOLARE PER LE ESIGENZE DELLA CLIMATIZZAZIONE

Si parla molto oggi di concetti come diagnosi energetica ed efficienza energetica degli edifici. La diagnosi energetica si propone come obiettivo primario quello di fornire un'analisi dei consumi energetici del sistema edificio-impianto e di individuare ipotesi di intervento finalizzate al conseguimento da un lato a condizioni di comfort ambientale e dall'altro ad una crescente attenzione al problema dell'incremento dell'efficienza energetica degli edifici.

Se sul primo aspetto si sono ottenuti significativi risultati, sul secondo i risultati non sempre sono incoraggianti.

La legge n. 10 del 1991, [1] e i successivi decreti di attuazione, in particolare il D.P.R. n. 412 del 26 agosto 1993, hanno avuto il merito di trasformare comuni criteri tecnici per l'uso razionale dell'energia in disposizioni alle quali tutti devono attenersi. L'entrata in vigore del D.Lgs. 192 dell'ottobre 2005, [2], ha poi intensificato l'attenzione verso alcuni aspetti, quali ad esempio quelli l'obbligo di posizionare i nuovi edifici in modo da ottimizzare l'esposizione al sole ed ai venti, pur mantenendo aperti alcuni problemi, il primo dei quali è il fatto che tali normative siano principalmente concentrate sul problema del riscaldamento invernale e non pongono limitazioni superiori ai consumi.

Il problema che resta tutt'ora aperto è quello della scarsa attenzione al problema della climatizzazione estiva che ha prodotto, in concomitanza con condizioni climatiche sfavorevoli, un crescente aumento dell'uso dell'energia per le esigenze del raffrescamento, ancor meno controllabile.

Questo è accaduto anche negli edifici universitari, sia adibiti a studi ed uffici, sia adibiti a complessi di aule e poli didattici.

I vari interventi volti al risparmio energetico tendono a porre l'accento sulla riqualificazione sia dell'aspetto impiantistico sia dell'involucro edilizio. Tra i possibili interventi volti al risparmio energetico si parla sempre più spesso di possibile uso dell'energia solare. Sistemi solari attivi per il riscaldamento e condizionamento sono proposti già da molti anni per l'uso in edifici pubblici e privati, ma fino ad oggi non si può dire che i risultati siano particolarmente significativi.

Eppure in Italia non esisterebbero controindicazioni alla diffusione del solare termico, sia in integrazione dei tradizionali impianti sia addirittura in maniera autonoma. Dei circa 1.400 kWh/m<sup>2</sup> che mediamente in regioni dell'Italia centrale come la Toscana ogni anno il sole diffonde su ogni metro quadro di superficie terrestre, un valido impianto solare ne potrebbe trasformare almeno il 40%, quindi circa 600 kWh/anno, in acqua calda o in altro effetto termico utile.

Non è tuttavia facile conciliare il raggiungimento di condizioni ottimali di insolazione con le esigenze del contenimento delle dimensioni degli impianti e del risparmio energetico. In questo tipo di analisi due sono le quantità di maggior interesse:

- 1) la taglia o la capacità dell'impianto di climatizzazione;
- 2) il fabbisogno energetico complessivo dell'impianto.

La determinazione della taglia dell'impianto è basata sulle condizioni operative peggiori, mentre il consumo annuale di energia è legato a delle condizioni medie di funzionamento.

I metodi con i quali si effettua il contenimento dei consumi si tende a lavorare sempre di più sull'involucro edilizio, cercando di limitare per quanto possibile la trasmittanza dell'involucro, operando sia sulle strutture, sia sulla riduzione delle conducibilità termiche dei materiali.

La progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti di climatizzazione è stata modificata con l'obiettivo di contenere i consumi di energia, ma ad un esame attento risulta molto difficile conciliare i metodi proposti dalla normativa con la prospettiva di introdurre innovazioni impiantistiche significative, quali quelle costituite da una utilizzazione sistematica dell'energia da fonte solare, che potrebbe diventare molto utile soprattutto al fine di fare fronte alle esigenze della climatizzazione estiva.

L'estate, infatti, è il periodo che fa registrare la maggiore richiesta di condizionamento e coincide proprio con i mesi durante i quali la radiazione solare è al massimo e le giornate sono più lunghe.

Se si pensa alle prospettive della climatizzazione solare, occorre avere ben presente che l'edificio non è dal punto di vista termico una struttura statica, ma cambia continuamente il proprio stato termico in dipendenza dalle condizioni climatiche locali (temperatura dell'aria esterna, velocità del vento, radiazione solare), dall'esposizione dell'edificio, dalla sua massa, dal tipo di protezione solare, dalla posizione e dimensione delle aperture.

Dalle considerazioni precedenti appare evidente come nella progettazione di un edificio sia molto importante, in prima battuta, conoscere gli effetti termici legati all'inerzia della struttura e gli eventuali sfasamenti determinati dall'involucro. E' infatti importante la gestione vantaggiosa di effetti di compensazione e di sfasamento legati alla struttura e questo quindi richiede una modellizzazione in transitorio della stessa.

Nello stesso tempo occorre avere ben presente la variabilità della radiazione solare incidente, che è ad un tempo un effetto positivo (maggiore energia disponibile), ma anche negativo (maggiori potenze termiche trasmesse).

Quanto appena detto delinea la complessità del problema che si pone come un vero e proprio problema di ottimizzazione multivariabile in cui si interfacciano tre diversi sottosistemi: il sistema di captazione solare, l'impianto e il sistema edificio. La sua soluzione richiede, oltre che la definizione di precisi obiettivi progettuali (non sempre facilmente identificabili), anche la elaborazione di modelli di valutazione un minimo complessi che vadano oltre le regole di semplice utilizzazione tratte dalle normative e prevedano l'interconnessione tra i tre sottosistemi.

## 2. RADIAZIONE SOLARE: METODOLOGIE PER LA STIMA

Nel caso in cui si pensi ad una utilizzazione dell'energia solare per scopi energetica un primo problema da valutare è quello di una stima precisa dell'energia che può essere resa disponibile. La normativa fornisce dei dati, ma in generale si tratta di dati medi, che dal punto di vista tecnico non sempre possono essere particolarmente utile.

L'intensità della radiazione solare incidente su una superficie orientata in maniera generica è legata all'angolo d'incidenza tra il raggio solare e la normale alla superficie, che dipende a sua volta da cinque diversi angoli:

- dalla latitudine ( $\phi$ )
- dal giorno dell'anno ( $\delta$ )
- dall'ora del giorno ( $\omega$ )
- dall'inclinazione della superficie ( $\beta$ )
- dall'angolo azimutale ( $\gamma$ )

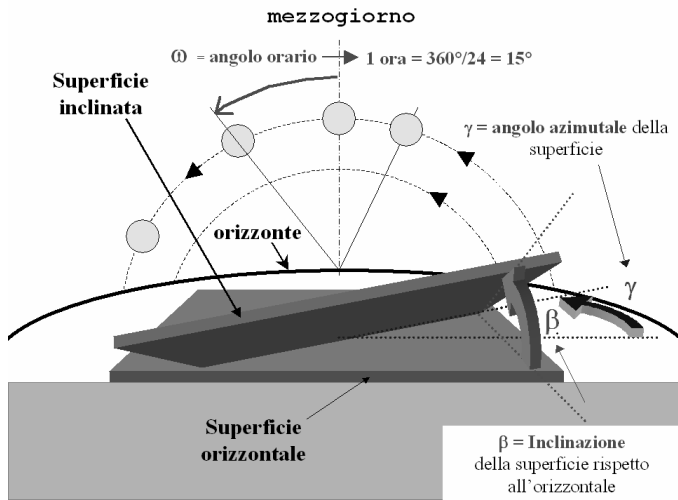


Figura 1. Angoli per valutare la radiazione solare

L'orientazione della superficie (legata ai due angoli, riportati in Fig. 1,  $\beta$ , inclinazione e  $\gamma$ , angolo azimutale) permette di ottenere sensibili variazioni dell'energia in ingresso al sistema di raccolta [6]. In generale, se  $I_s$  è la costante solare ( $1367 \text{ W/m}^2$ ) la radiazione che incide su una superficie genericamente orientata  $L$  può essere approssimata con

$$I_{\perp} = I_s \cdot e^{-\frac{cx}{\sin\theta_z}} \cdot \cos\theta \quad (1)$$

dove  $e^{-cx}$  rappresenta il generico fattore di attenuazione, che può assumere un valore compreso tra 0.6 (giornate particolarmente nuvolose e umide) e 0.8 e  $\theta$  è l'angolo tra la normale alla superficie e la direzione della radiazione incidente ( $\theta_z$  è l'angolo di incidenza nel caso in cui la superficie sia orizzontale). Per una superficie orizzontale disposta in direzione sud (angoli  $\beta = 0^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ) si ottiene che

$$\cos\theta = \cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta \quad (2)$$

Per una superficie genericamente orientata si dimostra che:

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cos\beta + \sin\phi \cos\delta \cos\omega \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \sin\omega \sin\beta \sin\gamma - \cos\phi \sin\delta \sin\beta \cos\gamma \quad (3)$$

Nella pratica progettuale si fa spesso riferimento a dei dati medi di irraggiamento, espressi in  $\text{kJ/m}^2$  giorno o in  $\text{kJ/m}^2$  mese: sulla base di tali dati nell'Italia centrale si hanno dei valori che oscillano tra i 7000-8000 e i 20000-22000  $\text{kJ/m}^2$  giorno e i 250 e i 750  $\text{MJ/m}^2$  mese.

L'utilizzazione dei dati medi non fa percepire l'effetto di una importante variabile che è l'angolo di inclinazione del collettore solare ( $\beta$ ).

Come si può vedere in Fig. 2, una orientazione particolare delle superfici di captazione solare permette tuttavia di intensificare o di attenuare in maniera mirata la differenza tra l'energia prodotta in condizioni estive ed invernali.

Se la massimizzazione dell'energia raccolta durante l'anno è ottenuta con un certo angolo di inclinazione ( $\beta=33^\circ$ ), la massimizzazione del picco estivo ( $\beta=19^\circ$ ) o il massimo del picco invernale ( $\beta=61^\circ$ ) si ottengono con due valori completamente diversi dell'inclinazione del collettore.

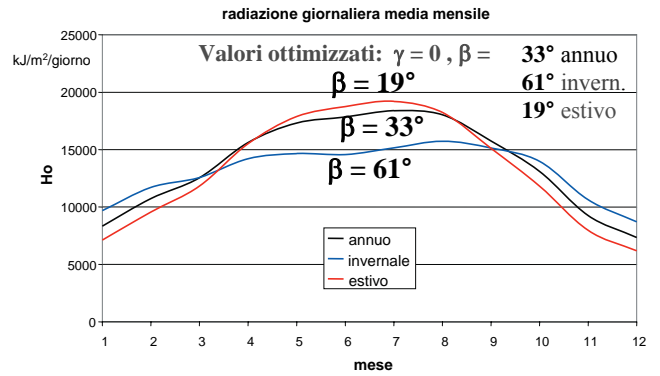


Figura 2. Differenze ottenibili con differenti orientazioni

### 3. MODELLI PER LA DETERMINAZIONE DEL COMPORTAMENTO DELL'EDIFICIO

Il dimensionamento degli impianti di climatizzazione, in condizioni estive, richiede la messa a punto di alcuni modelli previsionali del comportamento dell'edificio che tengano conto della variabile tempo. Per questo risulta molto importante, oltre che conoscere la trasmittanza termica della struttura, solitamente considerata dalla normativa, anche metterla in relazione con le capacità termiche complessive, la conducibilità termica e la diffusività termica delle stesse. Nel seguito sono riportati brevemente i tre modelli sviluppati. Si tratta di modelli a parametri concentrati. ([7-8])

(2) (3)

#### 3.1 Effetti termici inerziali

Questo modello è quello più semplice e schematizza l'intero edificio come una struttura a guscio, oppure ciascuna della 4 pareti come una piastra semi-infinita. Ad essa può essere applicata la teoria monodimensionale. Definita una temperatura adimensionale come

$$\theta(x, t) = \frac{T(x, t) - T_{est}}{T_{int} - T_{est}} \quad (4)$$

dove  $T_{int}$  e  $T_{est}$  sono le temperature della parete all'interno ed all'esterno esterna; si può definire una costante di tempo della struttura come

$$\tau = \frac{\rho c_p V}{US} \quad (6)$$

essendo  $\rho$  la densità media del materiale della struttura,  $c_p$  il calore specifico medio,  $V$  il volume delle parti solide che costituiscono la struttura,  $U$  è la conduttanza globale dell'involucro,  $S$  la superficie esterna di scambio.

$$\theta(x, t) = K e^{-t/\tau} \quad (5)$$

Dove  $K$ , unitario nel caso di superfici sferiche è un fattore di attenuazione legato al particolare tipo di struttura. In [7] sono disponibili soluzioni del problema che permettono di individuare la storia termica di un corpo sottoposto istantaneamente ad una riduzione della temperatura delle pareti; in questo caso la temperatura adimensionale ovvero il rapporto  $\theta/\theta_0$  è espresso in funzione della forma, della diffusività termica a delle pareti, del tempo  $t$  e dello spessore della parete  $s$ . Sfruttando opportunamente i modelli descritti si riesce ad avere un comportamento indicativo dell'edificio

legato all'inerzia termica e la risposta delle pareti. Questo può essere utile per valutare gli effetti provocati da incrementi o abbassamenti piuttosto rapidi della temperatura esterna, quale ad esempio l'abbassamento notturno o interna (quando gli impianti cominciano ad operare).

### 3.2 Modello per l'analisi del transitorio termico

Gli effetti dovuti al transitorio termico sono maggiormente comprensibili adottando un altro modello analitico. Invece dell'edificio intero, si passa a simulare il comportamento di una singola parete, ovviamente individuando quella più sollecitata termicamente e adottando una schematizzazione monodimensionale. Con questo secondo modello si vuole analizzare l'andamento della temperatura nel tempo lungo lo spessore di una singola parete. L'obiettivo di tale schematizzazione è di capire, in base all'avanzamento del fronte termico nella parete, quale capacità può avere la parete di sfasare nel tempo i picchi di temperatura e quindi i carichi termici. Questo permette di comprendere quali margini si possono avere tra le condizioni in cui sarebbe necessaria la massima potenza riscaldante (o refrigerante) dell'impianto e le condizioni di massimo carico termico. Le variabili che entrano in gioco sono la diffusività termica della parete ( $\alpha$ ) e la conducibilità termica ( $\lambda$ ). Il problema è schematizzabile come monodimensionale non stazionario, con condizioni al contorno non omogenee [8]; la soluzione è studiata a partire dalla equazione di Fourier, con  $x$  coordinata di parete.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

con condizioni al contorno di scambio convettivo del tipo:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 = h_i (T_{int} - T(0, t)) \quad (8a)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_L = h_c (T(L, t) - T_{est}) \quad (8b)$$

$$0 < x < L \quad t > 0 \quad T_{int} \neq T_{est}$$

La soluzione del problema è rappresentata da una espressione funzionale del tipo

$$T(x, t) - T_{int} = \eta(x) + \theta(x, t) \quad (9)$$

dove  $\eta(x)$  è la funzione stazionaria che rende omogenee le condizioni al contorno, mentre  $\theta(x, t)$  è la funzione che risolve il transitorio monodimensionale

### 3.3 Effetti della variazione della temperatura esterna

La soluzione del problema di solido semi-infinito, già discusso nel precedente paragrafo può essere modificato introducendo con andamento della temperatura periodico  $T_{est} = T_{est}(t)$ ; esso può essere utilizzato per valutare gli effetti di sfasamento tra le condizioni in cui si ha la massima temperatura esterna e quelle in cui si ha la massima temperatura di parete interna. E' chiaro che la condizione più favorevole è quella in cui le due temperature oscillano in opposizione di fase: le condizioni di massima temperatura interna si hanno in ore notturne.

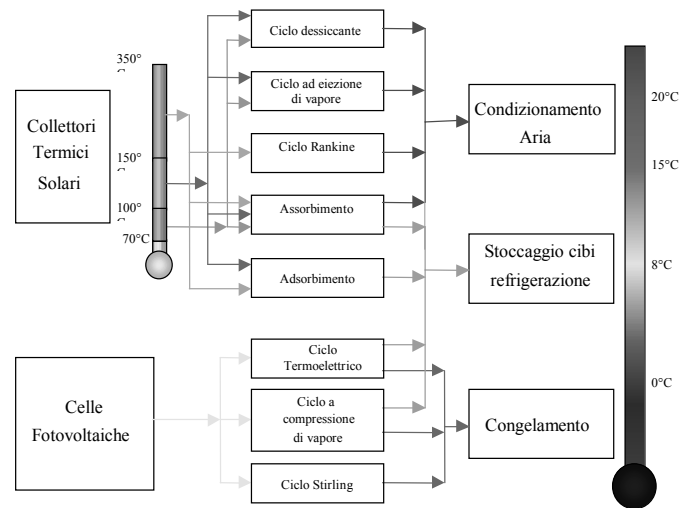


Figura 3. Sistemi per la refrigerazione solare

## 4. SISTEMI PER LA REFRIGERAZIONE SOLARE: STATO DELL'ARTE GENERALE E PROSPETTIVE

Lo sfruttamento dell'energia solare per le esigenze della climatizzazione di edifici adibiti a civile abitazione è un'idea che si è sviluppata già a partire dalla crisi energetica negli anni '70. Tuttavia le tecnologie consolidate che possono essere ragionevolmente utilizzate non sono moltissime. [9]

In Fig. 3 sono mostrati una serie di percorsi possibili per lo sfruttamento dell'energia solare per tali sistemi. I sistemi termici solari sono più adatti per il condizionamento degli ambienti rispetto a quelli fotovoltaici per il loro minor costo di installazione. Inoltre il rendimento dei sistemi termici è generalmente più elevato. Esistono diversi modi per il condizionamento degli ambienti utilizzando energia solare termica: tra questi i cicli ad assorbimento e a adsorbimento, ma anche sistemi diversi quali i cicli dessiccanti, e i sistemi ad eiezione di vapore. I sistemi più idonei sembrano essere quelli ad assorbimento e quelli a adsorbimento; in questa maniera si ha una utilizzazione diretta del calore ottenibile per il raffrescamento. Non sembra invece praticabile la strada dell'accoppiamento di un sistema fotovoltaico con un sistema di condizionamento alimentato elettricamente, per i bassi valori del rendimento e gli elevati costi economici.

### 4.1 Sistemi ad assorbimento

I sistemi ad assorbimento tradizionale sostituiscono la compressione del vapore dei tradizionali sistemi refrigeranti con un sistema costituito dal complesso di un assorbitore e di un rigeneratore. Per funzionare richiede due fluidi operativi: il refrigerante e l'assorbente. In Fig. 4 è rappresentato lo schema di un refrigeratore ad assorbimento a singolo effetto. Rispetto ad un ciclo a compressione di vapore il lavoro di compressione è sostituito da un pompaggio (P) in fase liquida della miscela refrigerante-assorbente (ad esempio acqua e bromuro di litio).

Refrigerante ed assorbente devono essere separati mediante fornitura di calore (fase di generazione) nel generatore (G); questa può essere anche mediante energia solare. In questo caso il COP del sistema è il rapporto tra il calore  $Q_2$  che deve essere fornito nella fase di generazione ed il calore  $Q_0$  sottratto alla sorgente fredda, ovvero all'ambiente da raffrescare essendo trascurabile il lavoro compiuto per il pompaggio.

$$COP = Q_0 / Q_2 \quad (10)$$

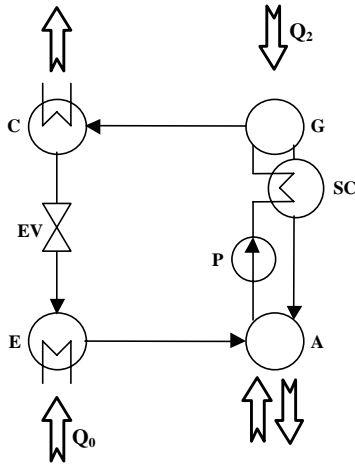


Figura 4. Sistemi refrigeranti ad assorbimento: schema tecnico

Se in linea di principio, con riferimento alla Fig. 5 si ha che

$$COP \leq COP_{id} = \frac{T_{ev} (T_{gen} - T_{cond})}{T_{gen} (T_{cond} - T_{ev})} \quad (11)$$

nella pratica il COP di macchine refrigeranti ad assorbimento non è mai superiore all'unità (in genere il valore è intorno a 0.6). Se si aggiunge a questo il fatto che l'energia solare è raccolta mediante un collettore solare con efficienza dell'ordine di 0.4, ne risulta che per ogni kW termico di calore sottratto alla sorgente fredda, sono necessari almeno 4 kW di potenza termica assorbita dal sole, ovvero, anche in condizioni di massima insolazione circa 5 m<sup>2</sup> di superficie.

Una ulteriore controindicazione dei sistemi ad assorbimento è il fatto che essi operano a ciclo continuo; ciò potrebbe non rappresentare un particolare handicap, in linea di principio, visto che si ha maggiore disponibilità di energia proprio nelle ore più calde, ma è una caratteristica che rende comunque il sistema piuttosto rigido. Quando non si ha insolazione non è possibile raffrescamento. La temperatura dell'evaporatore  $T_{ev}$  e la temperatura del condensatore sono fissate entro un intervallo di qualche grado (Fig. 5). Le proprietà termofisiche dei fluidi di lavoro usati, determina la richiesta di energia termica per la separazione di assorbente e refrigerante e la temperatura di generazione.

#### 4.2 Sistemi ad adsorbimento

Il fenomeno dell'adsorbimento è molto simile a quello ad assorbimento visto in precedenza, sebbene nei rispettivi cicli di lavoro si possano osservare delle sostanziali differenze.

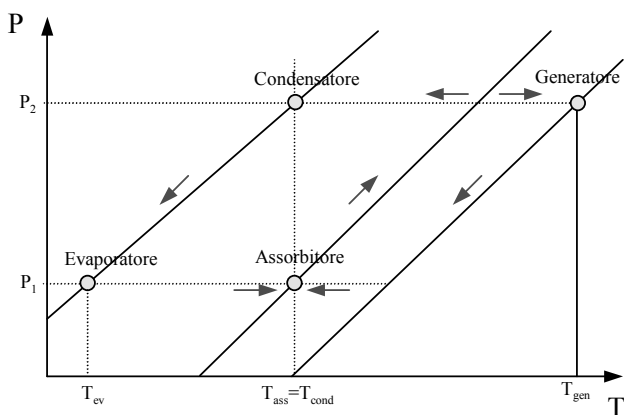


Figura 5. Sistema ad assorbimento: schema termodinamico

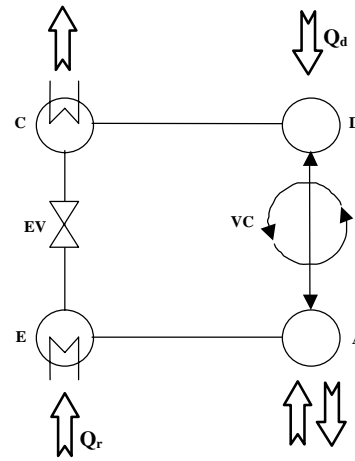


Figura 6. Sistemi refrigeranti ad adsorbimento: schema tecnico

Questo processo consiste nella separazione di una sostanza da una fase per concentrarsi o accumularsi sulla superficie di un'altra sostanza, la fase che adsorbe è chiamata "adsorbente", mentre il fluido che è accumulato, concentrato o adsorbito si chiama "adsorbito". [10].

In questo tipo di ciclo il vapore del fluido refrigerante è adsorbito da un solido con una porosità relativamente elevata. Questo processo non richiede energia meccanica ma solo termica. Il principio di funzionamento di questi particolari sistemi prevede la separazione tra i due processi: adsorbimento o refrigerazione e desorbimento o rigenerazione (Fig. 6).

L'adsorbente è caratterizzato in base alla tipologia della superficie e dalla porosità. Per questo motivo solitamente si utilizzano soluzioni solide (ad esempio sali). Tipici esempi di coppie utilizzate per sistemi ad assorbimento sono H<sub>2</sub>O-LiCl, H<sub>2</sub>O-Zeolite, Metanolo-Carboni attivi). Tali cicli possono operare con sorgenti di calore inferiori ai 100°C (Fig. 7). Anche qui il coefficiente di effetto utile definito su base puramente termica:

$$COP = Q_d / Q_r \quad (12)$$

dove  $Q_d$  è il calore necessario per il desorbimento e  $Q_r$  è il calore asportato per refrigerazione. Anche in questo caso i COP non superano valori di 0.5-0.6. Ma l'interesse per questa particolare soluzione, oggi rintracciabile in alcune soluzioni commerciali, è la possibilità di disaccoppiare le due fasi di adsorbimento e desorbimento. Ciò permette di rendere indipendente il funzionamento del sistema refrigerante dalla radiazione solare. Inoltre le massime temperature operative sono più basse di quelle dei sistemi ad assorbimento.

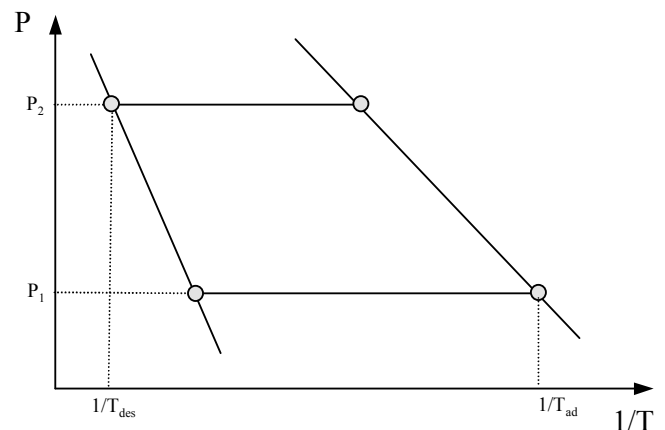


Figura 7. Sistemi ad adsorbimento: schema termodinamico

## 5. UTILIZZAZIONE DI SISTEMI ELIO-ASSISTITI PER LA CLIMATIZZAZIONE DI EDIFICI UNIVERSITARI

Dopo aver inquadrato il problema dal punto di vista normativo, modellistico e tecnico, si è tentato di studiare un'applicazione ad un caso reale.

Il caso preso in esame riguarda un polo didattico della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa che è attualmente in fase di ristrutturazione. L'edificio è a pianta rettangolare con il lato corto di 35 m e il lato lungo di circa 65 m, l'altezza di circa 5 m. Il lato corto è disposto in posizione Nord-Sud, mentre il lato lungo in direzione Est-Ovest. L'edificio presenta quindi una cubatura di oltre 11000 m<sup>3</sup>, una superficie di scambio pari a circa 1000 m<sup>2</sup> (sui lati), mentre la superficie della copertura a disposizione è di circa 2275 m<sup>2</sup>.

L'analisi è motivata dalla crescente attenzione da parte dell'Università per lo sviluppo delle fonti rinnovabili e dalla volontà di acquisire esperienza nella loro gestione.

Nell'ambito di questo progetto, si è presa in considerazione la possibilità di attuare un intervento energetico volto ad una riduzione del consumo di energia elettrica, prevedendo l'installazione di un impianto a pompa di calore che possa svolgere funzioni integrative in fase invernale e l'intero servizio di controllo termico in estate.

Per quanto riguarda l'impianto, si sono presi a riferimento i dati di una macchina disponibile in commercio. Esso è costituito da un sistema di collettori solare, che permettono di ottenere acqua ad una temperatura sufficientemente elevata (la temperatura del pannello deve essere superiore di almeno 50 °C alla temperatura esterna). L'effetto refrigerante è prodotto per la presenza di una miscela di cloruro di litio. La distribuzione dell'aria refrigerata, che scambia calore con la sorgente fredda, può essere ottenuta mediante sistema a fan-coil o alternativamente un sistema di pavimenti, pareti o soffitti radianti.

Anche in seguito ad una ottimizzazione dei collettori solari (combinazione angolo di inclinazione  $\beta$  e portata di acqua circolante), emerge chiaramente la difficile sostenibilità di interventi come quello proposto (ogni 10 kW di potenza refrigerante richiedono circa 40 m<sup>2</sup> di pannellatura).

Tenendo conto degli attuali vincoli normativi sui ricambi di aria, questo significa che, per quanto si possa operare bene allo scopo di contenere i carichi termici, per ottenere un raffrescamento sufficientemente significativo dell'edificio, potrebbero comunque essere necessari circa 500-600 m<sup>2</sup> di collettori. L'intervento è difficilmente giustificabile su base economica ove non siano presenti significative incentivazioni, anche se potrebbe essere strategicamente importante allo scopo di dimostrare come si possano porre dei limiti ai consumi soprattutto per il raffrescamento estivo.

E' tuttavia da sottolineare il fatto che se il conto energia fotovoltaico incentiva in maniera molto favorevole la produzione di energia elettrica di taglia da 20 a 50 kW, che alla fine richiedono anch'essi superfici dei pannelli di qualche centinaio di m<sup>2</sup>, potrebbe essere presa in considerazione anche l'incentivazione di interventi volti anziché alla produzione di elettricità addizionale, alla riduzione dei consumi elettrici complessivi, come quello considerato in questo paragrafo.

### CONCLUSIONI

L'utilizzazione dell'energia solare termica abbinata con l'uso di gruppi frigoriferi ad assorbimento o ad adsorbimento

potrebbe rappresentare in linea di principio una interessante soluzione impiantistica per edifici pubblici e scolastici in genere, caratterizzati da carichi termici elevati ma fortemente variabili, in dipendenza delle notevoli differenze sui carichi termici interni e sui carichi termici esterni.

La diffusione di tali soluzioni potrebbe contribuire ad un significativo controllo dei consumi energetici estivi, soprattutto nel caso di impianti alimentati esclusivamente da energia solare senza ricorso a soluzioni integrative.

Le valutazioni dimostrano come una prospettiva di questo tipo si possa ottenere solo mettendo in gioco notevoli superfici di collettori solari.

Molto si può ottenere operando sull'ottimizzazione dei singoli sottosistemi e delle loro interconnessioni.

Il problema principale e male riducibile sembra allo stato attuale rappresentato soprattutto dalle esigenze della ventilazione. La necessità di ottenere un certo numero di ricambi d'aria orari richiede un fabbisogno energetico addizionale assai rilevante anche in presenza di carichi termici non eccessivamente elevati, ottenuti operando in maniera opportuna sull'involucro.

In edifici con grandi volumetrie come le aule adibiti a poli didattici questo finisce per determinare notevoli incrementi della dimensione degli impianti e di conseguenza aggravii sui costi di installazione. Ciò alla fine potrebbe finire per scoraggiare ancora una volta questo tipo di intervento. Nonostante se ne parli molto, la strada di una proficua utilizzazione dell'energia solare in questo tipo di edifici, che pure si presterebbero meglio di altri alla utilizzazione, sembra ancora lontana e non ben delineata.

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Legge 9 gennaio 1991, n. 10, Norme per l'attuazione del Piano Energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili.
2. D.Lgs. 19 agosto 2005, n. 192, Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.
3. UNI 10375, Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli edifici, Aprile 1995.
4. UNI EN ISO 13791, Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione - Criteri generali e procedure di validazione, 2005.
5. UNI EN ISO 13792, Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione - Metodi semplificati, 2005.
6. W. B. Stine, R.W. Harrigan, Solar Energy System Design, John Wiley and Sons, 1985. disponibile parzialmente in rete ([www.powerfromthesun.net](http://www.powerfromthesun.net)).
7. E.R.G Eckert, R.M. Drake, Analysis of Heat and Mass Transfer, Mc Graw Hill, 1972.
8. A. Bejan, Heat Transfer, John Wiley and Sons, 1993.
9. C. A. Balaras, G. Grossman, H.M. Henning, C. A. Infante Ferreira, E. Podesser, L. Wang, E. Wiemken, Solar air conditioning in Europe - an overview. Renew. and Sust. Energy Reviews 11, 299-314, 2007.
10. F. Ziegler, Recent developments and future prospects of sorption heat pump systems, Internat. Journal of Therm. Sci. 38, 191-208, 1999

## L'USO DELLA TERMOGRAFIA PER UNA CORRETTA DIAGNOSI ENERGETICA MIRATA AD UNA RIDUZIONE DEI CONSUMI

F.Fantozzi <sup>1</sup>, S.Filippeschi <sup>1</sup>, Santini T. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Energetica “Lorenzo Poggi” – Università di Pisa  
Via Diotisalvi 2, 56126 – Pisa Tel. +39.050.2217100 – Fax +39.050.2217150  
f.fantozzi@ing.unipi.it, s.filippeschi@ing.unipi.it

<sup>2</sup> STT Studio ThermoTech. s.a.s  
Via Bottaccio, 28 – 54100 – Massa Tel. 0585.2330896 – Fax 0585.234523  
tiziana.santini@vmsystem.net

### SOMMARIO

La diagnosi degli edifici esistenti è argomento di elevato interesse anche nell'ambito della certificazione energetica. L'impiego di tecniche termografiche permette di fotografare le pareti di un edificio nella loro interezza, ma fornisce valutazioni di tipo qualitativo. In questo lavoro si propone un metodo per individuare i materiali che compongono una parete intonaca, utilizzando tecniche di termografia “attiva” e analizzando la parete oggetto dell'indagine durante i transitori di riscaldamento. La fattibilità di tale tecnica è stata verificata, in maniera preventiva, attraverso una simulazione numerica. Sono stati proposti due modelli di calcolo per la simulazione di pareti intonacate sottoposte ad un flusso termico radiante diffuso. Il primo modello prevede la schematizzazione di tutti gli strati costituenti una parete tipo con il metodo alle differenze finite esplicito; il secondo, l'applicazione della schematizzazione alle differenze finite solo allo strato superficiale di intonaco e quella analitica di solido semi-infinito alla parete sottostante (metodo “ibrido”). Tutti i risultati sono stati confrontati con la soluzione analitica del solido semi-infinito sottoposto ad un flusso termico costante. Oltre a stabilire l'attendibilità del metodo “ibrido” e gli errori predittivi commessi, le simulazioni sono state utilizzate per dimostrare che un'indagine di termografia attiva può effettivamente individuare non solo la forma, ma anche il tipo di materiale presente al di sotto di uno strato di intonaco.

### INTRODUZIONE

Per attuare la certificazione energetica degli edifici esistenti e per controllare la conformità del progetto al costruito di quelli nuovi è necessario valutare la trasmittanza dei paramenti murari. Qualora non si conosca la stratigrafia della parete, l'approccio sperimentale prevede l'effettuazione di indagini distruttive (carotaggio, endoscopia) o l'applicazione di termoflussimetri e sensori di temperatura come prescritto dalla ISO 9869 [1]. Tuttavia tale metodologia diagnostica oltre a richiedere tempi di analisi lunghi suggerisce comunque una preventiva analisi termografica al fine di escludere punti singolari. In questa prospettiva l'individuazione dei materiali presenti sotto lo strato di intonaco, con un'indagine non distruttiva come la termografia, permetterebbe di procedere alla loro caratterizzazione in tempo reale e con continuità e, quindi, di stabilire il peso che hanno nel calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio [2]. Per ricavare informazioni quantitative dall'indagine termografica è tuttavia necessario ricorrere a metodi transitori [3].

Lo scopo della nostra ricerca è proprio quello di riuscire ad individuare i materiali che compongono la compagine muraria unicamente in funzione dei “tempi di comparsa” in modalità di ripresa termografica “attiva” [4].

In precedenti indagini termografiche eseguite dal Dipartimento di Energetica di Pisa all'interno e all'esterno di numerosi palazzi storici in Toscana [5], [6], le potenzialità dell'analisi sono risultate dipendere significativamente dalla chiarezza dell'immagine nell'infrarosso correlata, a sua volta, al rapporto tra le proprietà termiche dei materiali. I materiali normalmente impiegati in edilizia sono stati quindi classificati

in funzione della loro diffusività, in modo da prevederne l'attitudine a differenziarsi tra di loro e dalla malta dei giunti quando, nel corso di una ripresa termografica, siano sottoposti ad una stimolazione termica [7].

Nel presente lavoro vengono illustrati i risultati ottenuti con tre modelli di calcolo che simulano il comportamento in transitorio di una parete intonacata su entrambe le facce e riscaldata da un riscaldatore radiante a gasolio. I metodi di risoluzione adottati spaziano da quello del solido semiinfinito a quello approssimato alle differenze finite. Sebbene il primo fornisca una soluzione continua nel tempo e nello spazio, le ipotesi di applicazione ai casi reali sono fortemente restrittive. Viceversa le soluzioni numeriche permettono di trattare geometrie irregolari e condizioni al contorno variabili nel tempo ma richiedono, talvolta, un procedimento molto laborioso. Si è quindi pensato ad una soluzione “ibrida” che considerasse una parete semi-infinita preceduta da una lastra di intonaco, limitando al suo spessore, la trattazione alle differenze finite. Con i tre modelli si è valutato il contrasto termico leggibile sulla superficie irradiata dell'intonaco al variare del materiale retrostante e il tempo di riscaldamento necessario per raggiungere un determinato valore del contrasto termico. Tale periodo, denominato “appearing time” [7], permette di stabilire la successione temporale secondo la quale compaiono sull'immagine all'infrarosso i diversi materiali.

Alcuni timidi riscontri sperimentali testimoniano l'attendibilità del metodo, per cui dall'analisi termografica del processo di riscaldamento di una parete in transitorio, sembra effettivamente possibile individuare il tipo di pietra o di mattone costituente la parete in base ai tempi di comparsa dei diversi materiali sul termogramma.

## DIAGNOSI DI PARETI CON TECNICHE ATTIVE

### Analisi termografiche in transitorio di pareti esistenti

In passato, presso il Dipartimento di Energetica di Pisa, sono stati raccolti numerosi termogrammi di pareti intonacate, diversamente tessute, sia in modalità di ripresa termografica attiva che passiva [5], [6]. Mentre una fotografia statica nell'infrarosso fornisce indicazioni esclusivamente qualitative sulla tessitura muraria di una parete, le tecniche in transitorio permettono di condurre analisi anche quantitative [3].

In fig. 1 è riportata l'immagine infrarosso della porzione di una parete interna di un edificio storico di Lucca. E' possibile notare come gli elementi lapidei, celati alla vista dallo strato di intonaco, si distinguano chiaramente dalla malta di commento durante la ripresa IR. Tuttavia la presenza dell'intonaco e la risoluzione della termocamera rendono l'immagine non eccessivamente nitida risultando quantomai complicato definire con esattezza i bordi del singolo elemento costitutivo.



Fig. 1. Esempio di immagine termografica di parete interna.

L'elaborazione di una immagine termografia, o di una successione temporale di esse, è un problema di estrema attualità applicabile ai settori più disparati della tecnica. Solitamente i bordi di zone considerate di interesse (difetti strutturali, distacchi di intonaco, zone con umidità, etc) appaiono sfumati a causa di numerosi fattori che contribuiscono al degrado dell'immagine [4]. Se lo scopo è poi quello di individuare i bordi delimitanti un elemento costruttivo inserito nella malta cementizia, il degrado dell'immagine può essere aumentato dallo spessore dello strato di intonaco sovrastante.

Le tecniche di elaborazione dell'immagine termografica utilizzate sono principalmente le seguenti: il contrasto termico, la normalizzazione e alcune tecniche più raffinate, impiegate in campo industriale, che si basano sull'analisi in frequenza del segnale. La tecnica utilizzata in edilizia è quella del contrasto termico, cioè della differenza di temperatura superficiale tra pixels sottostanti l'elemento della tessitura e pixel sottostanti la malta di commento. La scelta dell'area di competenza delle due singole aree deve essere scelta selettivamente dall'operatore che elabora l'immagine; tecniche automatiche di definizione delle zone di interesse applicate ad immagini termografiche di pareti esistenti hanno infatti fornito risultati non soddisfacenti [7].

### Simulazione numerica di una parete in transitorio

L'andamento della temperatura superficiale in un mezzo solido omogeneo viene di solito simulato approssimando la parete con un solido semi-infinito. Se il transitorio è breve tale approssimazione è lecita, ma nel caso di pareti di edifici dove

le fasi di riscaldamento hanno durata di alcune ore, tale ipotesi cade in difetto. In [2] viene proposta l'analisi in transitorio di una parete riscaldata e successivamente raffreddata in convezione naturale. Tale analisi è effettuata tramite un software elaborato all'interno dell'Università di Tomsk. In tali condizioni tuttavia la stima della temperatura superficiale e quindi del contrasto termico, dipende fortemente dalla conoscenza dei coefficienti di scambio convettivi, variabili caso per caso e difficilmente misurabili.

Al contrario l'idea alla base della presente attività numerica è quella di analizzare il comportamento di una parete durante la fase di riscaldamento effettuata con un riscaldatore radiante a gasolio. Questo è schematizzato come una sorgente radiante a temperatura costante in modo da poter trascurare il contributo convettivo e considerare esclusivamente il flusso termico radiante assunto uniformemente diffuso sulla superficie oggetto dell'indagine assimilata ad un corpo grigio. Deve essere formulata inoltre l'ipotesi che tra la malta cementizia e l'elemento strutturale in essa inserito non vi sia scambio di calore trasversalmente alla direzione prevalente del flusso termico. La parete è stata quindi immaginata formata da uno strato di intonaco sovrastante alternativamente due pareti di materiale omogeneo: la prima costituita solo da malta e la seconda dal materiale utilizzato nella tessitura. La validazione sperimentale del modello, effettuata su alcuni casi in situ, ha fornito errori contenuti sulla stima della temperatura superficiale.

### RISPOSTA TERMOGRAFICA DEI MATERIALI

La diversa risposta termografica dei materiali sotto lo strato di intonaco, varia sostanzialmente in funzione della differenza della loro diffusività termica. Elevati valori di  $\alpha$  implicano transienti rapidi, ossia rapidità di risposta alle sollecitazioni termiche e viceversa. Per i materiali edili il calore specifico  $c_p$  varia assai poco (è generalmente compreso tra 0,80 e 1,1 KJ  $kg^{-1} K^{-1}$  con l'esclusione dei materiali plastici e del legno) perciò il valore della diffusività termica  $\alpha$  dipende essenzialmente dalla densità  $\rho$  e dalla conducibilità termica  $\lambda$ .

Per molti materiali l'aumento della densità è ben compensato dall'aumento di  $\lambda$  per cui i valori di  $\alpha$  sono contenuti in un campo molto ristretto (per esempio per i laterizi  $\alpha=0,40-0,55 \cdot 10^{-6} m^2 s^{-1}$ ). Nel corso di un'indagine con termografo ad infrarossi sarà quindi utile studiare non tanto il valore assoluto delle proprietà termiche dei materiali edili quanto valutarne le prestazioni differenziali  $\Delta$ . In [7] le diffusività dei diversi materiali da costruzione sono state confrontate con quelle di una malta di riferimento consistente in un impasto misto di calce pozzolanica e sabbia la cui diffusività termica risulta  $\alpha=5,494 \cdot 10^{-7} m^2 s^{-1}$ . I valori delle diffusività termiche,  $\alpha$  ( $m^2 s^{-1}$ ), dei più comuni materiali da costruzione sono, invece, stati tratti in parte dalla letteratura tecnica [10], [11] ed in parte dai risultati di alcuni esperimenti svolti presso il Dipartimento di Energetica dell'Università di Pisa. Per meglio comprendere la relazione tra la variazione percentuale  $\Delta$  e la possibilità di distinguere l'elemento dalla malta, i più comuni materiali sono stati raggruppati all'interno di intervalli percentuali (Tab. 1) e già ordinati per valori crescenti di  $\Delta$ . Da riprese termografiche precedenti risulta che i materiali che presentano un maggior contrasto termico sono quelli con variazioni percentuali maggiori del 50%. Un diverso problema è invece rappresentato dal laterizio pieno. Esso presenta una diffusività molto simile a quella della malta ( $\pm 2 \%$ ).

Tab. 1: Classificazione dei materiali in funzione della variazione percentuale della loro diffusività

1-20%	20-25%	25-40%	40-60%	60-300%	> 300
1,11 (ciotoli $\rho=1500$ $\lambda=0,70$ $c=840$ )	20,10 (laterizio $\rho=1600$ $\lambda=0,59$ $c=840$ )	<b>29,68</b> (cls cell. autoocl. $\rho=500$ $\lambda=0,17$ $c=880$ )	40,07 (cls sabbia/ghiaia $\rho=2200$ $\lambda=1,49$ $c=880$ )	62,70 (acero $\rho=720$ $\lambda=0,18$ $c=1220$ )	437,05 (polistirolo esp. gran. $\rho=15$ $\lambda=0,054$ $c=1220$ )
2,5 (laterizio $\rho=2000$ $\lambda=0,90$ $c=840$ )	21,41 (cls argilla esp. $\rho=1500$ $\lambda=0,57$ $c=880$ )	34,19 (cls argilla esp. $\rho=1100$ $\lambda=0,35$ $c=880$ )	<b>48,00</b> (lat. semipieno $\rho=1000$ $\lambda=0,24$ $c=840$ )	<b>64,83</b> (abete $\rho=450$ $\lambda=0,12$ $c=1380$ )	509,71 (acciaio $\rho=7800$ $\lambda=52$ $c=1990$ )
9,72 (laterizio $\rho=600$ $\lambda=0,25$ $c=840$ )	22,00 (laterizio $\rho=1000$ $\lambda=0,36$ $c=840$ )	34,50 (cls cell. autoocl. $\rho=600$ $\lambda=0,19$ $c=880$ )	52,09 (int. gesso puro $\rho=1220$ $\lambda=0,35$ $c=1090$ )	70,09 (pino $\rho=550$ $\lambda=0,15$ $c=1660$ )	520,45 (cls blocchi cavi+isolante $\rho=250$ )
9,9 (int.sabbia/gesso $\rho=1400$ $\lambda=0,70$ $c=1010$ )	22,36 (laterizio $\rho=1200$ $\lambda=0,43$ $c=840$ )	35,36 (cls cell. autoocl. $\rho=800$ $\lambda=0,25$ $c=880$ )	52,94 (sabbia grossa $\rho=1700$ $\lambda=1,20$ $c=840$ )	<b>75,00</b> (basalto $\rho=2800$ $\lambda=3,50$ $c=1300$ )	561,81 (cls latero cemento $\rho=250$ $\lambda=0,80$ $c=880$ )
<b>13,33</b> (laterizio $\rho=1800$ $\lambda=0,72$ $c=840$ )	22,61 (laterizio $\rho=1400$ $\lambda=0,50$ $c=840$ )	37,95 (cls argilla esp. $\rho=700$ $\lambda=0,21$ $c=880$ )	<b>53,0556</b> (lat. forato $\rho=600$ $\lambda=0,13$ $c=840$ )	<b>81,75</b> (lava $\rho=2200$ $\lambda=2,9$ $c=1320$ )	4726,57 (rame $\rho=8900$ $\lambda=380$ $c=1610$ )
18,75 (laterizio $\rho=800$ $\lambda=0,30$ $c=840$ )	23,52 (sabbia secca $\rho=1700$ $\lambda=0,60$ $c=840$ )		57,43 (cls sabbia/ghiaia $\rho=2400$ $\lambda=1,91$ $c=920$ )	<b>164,72</b> (granito $\rho=2500$ $\lambda=3,20$ $c=880$ )	1163,88 (cls blocchi cavi $\rho=180$ $\lambda=1,10$ $c=880$ )
19,95 (cls sabbia/ghiaia $\rho=2000$ $\lambda=1,16$ $c=880$ )				<b>227,82</b> (tufo $\rho=2300$ $\lambda=2,90$ $c=700$ )	15729,37 (alluminio $\rho=2700$ $\lambda=209$ $c=890$ )

Il mattone pieno è infatti difficilmente individuabile sia in riprese passive di esterni che in quelle attive di interni.

## MODELLI DI CALCOLO UTILIZZATI

### Il solido semi-infinito con flusso di calore costante

Il primo caso cui facciamo riferimento è quello del solido semi-infinito soggetto ad un flusso di calore costante [8].

Il modello di corpo semi-infinito se applicato ad una parete intonacata, potrebbe suscitare qualche perplessità. Tuttavia, nel caso di spessori di intonaco ridotti e durante i primi istanti del fenomeno fisico simulato, il modello impiegato potrebbe essere attendibile. Tale soluzione analitica comunque rappresenta un interessante riferimento utile per confrontare gli andamenti limite delle soluzioni numeriche proposte.

L'andamento della temperatura in funzione del tempo in corrispondenza della superficie del solido semi-infinito,  $x=0$ , è descritto dall'equazione:

$$T(0,t) - T_i = \frac{2 \cdot q_0'' \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot t}{\pi}}}{\lambda} \quad (1)$$

dove  $T(0,t)$  è la temperatura superficiale del solido semi-infinito al trascorrere del tempo,  $T_i=T(x,0)$  è la temperatura iniziale della superficie esterna e  $q_0''$  rappresenta infine il flusso di calore che è mantenuto costante nel tempo.

### Il modello "ibrido"

Quello che affligge la precedente trattazione è, la mancanza dell'intonaco di rivestimento, il quale potrebbe attenuare il segnale termico proveniente dagli elementi retrostanti, ostacolando così la lettura della loro impronta termica.

Gli effetti legati alla presenza dello strato di intonaco sono stati considerati formulando un nuovo modello dove l'intonaco stesso, assimilato ad una lastra piana, viene anteposto alla parete omogenea. La parete continua comunque ad essere schematizzata come un solido semi-infinito (Fig. 2).

La risoluzione numerica del transitorio all'interno dello strato di intonaco è affrontato con il metodo numerico alle differenze finite esplicito. La parete invece è stata

schematizzato come un solido semi-infinito con superficie a temperatura imposta.

Il flusso di calore  $q_0''$  non è più costante ma varia in funzione del valore della temperatura superficiale  $T_0$  al passo precedente. Il valore del flusso diminuisce, quindi, progressivamente all'aumentare della temperatura superficiale dell'intonaco.

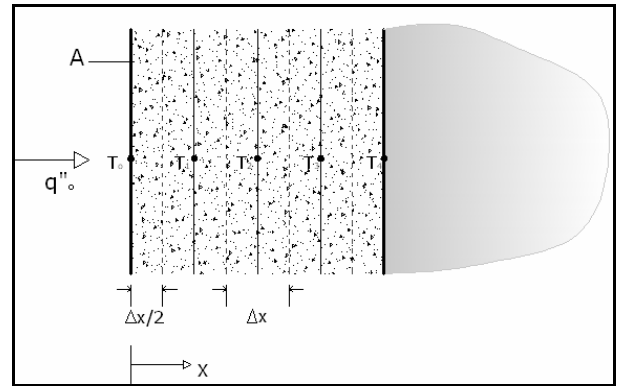


Fig. 2: Modellazione 'ibrida'

Un esempio della schematizzazione geometrica del modello e della scelta dei nodi è mostrato in fig. 1. Impostando l'equazione di bilancio di energia per il volume di controllo attorno ad ogni nodo, si trova che per il nodo di superficie, soggetto a flusso di calore  $q_0''(T_0^p)$  l'espressione di  $T_0^{p+1}$  è:

$$T_0^{p+1} = 2Fo \cdot \left( \frac{q_0''(T_0^p) \cdot \Delta x}{k} + T_1^p \right) + (1 - 2Fo) \cdot T_0^p \quad (2)$$

dove  $Fo$  è il numero di Fourier e tutti i parametri termici che compaiono sono riferiti all'intonaco

Per il nodo della superficie di interfaccia, a contatto con il solido semi-infinito, l'espressione di  $T_4^{p+1}$  è fornita dalla:

$$T_4^{p+1} = \frac{\frac{k}{\Delta x} \cdot (T_3^p - T_4^p) - \frac{k_2 \cdot (T_4^p - 20)}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_2 \cdot \Delta t}} + \rho \cdot c \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{T_4^p}{\Delta t}}{\rho \cdot c \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{1}{\Delta t}} \quad (3)$$

Le Eq. (2) e (3) consentono di trovare l'andamento della temperatura nei nodi dello strato di intonaco col trascorrere del tempo. Ovviamente, impiegando il metodo alle differenze finite esplicito, si rende necessaria la verifica del criterio di stabilità e ciò influisce sulla scelta del passo temporale  $\Delta t$  e di quello spaziale  $\Delta x$ .

### Le differenze finite metodo esplicito

Senza dubbio la semplificazione che abbiamo adottato nel considerare la parete retrostante l'intonaco come un solido semi-infinito è ancora affetta da ipotesi che introducono approssimazioni elevate nell'interpretazione del modello fisico. Una schematizzazione che può risultare utile per valutare l'attendibilità di questa modellazione e per stimare l'errore che eventualmente si commette nell'applicarla, è quella che prevede di trattare l'intera parete alle differenze finite con il metodo esplicito.

Si considera cioè la parete delimitata da due strati di intonaco di cui uno soggetto ad irraggiamento ed uno a contatto con l'ambiente ad una temperatura  $T_e$  pari a  $16,9^\circ\text{C}$  e lambita da aria in convezione naturale ( $h=7,7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ). Lo spessore di ciascuno strato di intonaco è assunto pari a 2 cm e le strisce elementari in cui questo viene suddiviso sono 10 di ampiezza  $\Delta x=0,002 \text{ m}$ . Lo spessore della parete tipo è posto uguale a 30 cm suddiviso in strisce di ampiezza  $\Delta x=0,002 \text{ m}$ .

I nodi sono scelti come mostrato in fig. 2. Impostando l'equazione di bilancio di energia per il volume di controllo attorno ad ogni nodo, si trovano le equazioni che assumono espressioni note [8] Ovviamente la scelta di  $\Delta x$  e di  $\Delta t$  sono tali da rispettare il criterio di stabilità e di congruenza.

## ATTIVITA' NUMERICA

### Simulazioni eseguite

Le simulazioni numeriche effettuate nel caso del metodo "ibrido" e in quello alle differenze finite esplicito hanno permesso di calcolare le temperature, sia superficiali che all'interno della parete, al variare del tempo. E' stato possibile inoltre valutare il contrasto termico nel tempo e l'"appearing time". Ogni risultato è stato confrontato con il modello teorico del solido semiinfinito, privo di intonaco sovrastante.

Tramite alcune valutazioni effettuate sperimentalmente in laboratorio è stata misurata la temperatura del riscaldatore ( $459 \text{ K}$ ), il fattore di vista tipo  $F=0,16$ , mentre la parete è stata sempre schematizzata sovrastata da uno strato di intonaco a temperatura iniziale di  $289,9 \text{ K}$  e avente le seguenti proprietà termiche:  $\rho=1800 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $c_p=910 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\lambda=0,90 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha=5,494 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  e  $\varepsilon=0,87$ . Lo spessore dello strato intonaco è stato variato da: 1 a 7 cm con passo unitario.

Per ogni spessore e per ogni metodo di calcolo sono stati calcolati tutti i parametri sopra descritti per i seguenti materiali, evidenziati in grassetto in tab. 1: **malta tipo** di riferimento, ( $\alpha=5,494 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), **laterizio pieno** ( $\alpha=4,762 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), **cls** ( $\alpha=3,55 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), **laterizio semipieno** ( $\alpha=2,857 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) e **forato** ( $\alpha=2,579 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), **abete** ( $\alpha=1,932 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), **rocce basaltiche** ( $\alpha=9,615 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), **tufacee** ( $\alpha=1,801 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), **laviche** ( $\alpha=9,986 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) e **granitiche** ( $\alpha=1,801 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ).

### Risultati

Nel presente lavoro sono restituiti solamente grafici riassuntivi di confronto, mentre una analisi dettagliata dei

singoli risultati è riportata in [12]. In fig. 3 sono riportati gli andamenti della temperatura superficiale, al variare dello spessore dell'intonaco, dopo 3 ore di riscaldamento, per tutti i materiali utilizzati nella simulazione con modello alle differenze finite, mentre in fig. 4 lo stesso grafico è riportato nel caso del modello di calcolo "ibrido".

Dall'analisi congiunta delle due figure si notano alcune particolarità da evidenziare. L'andamento della temperatura della malta non dipende dallo strato di intonaco, poiché la malta tipo scelta ha le stesse caratteristiche termiche dell'intonaco. Si nota inoltre che in entrambi i modelli di calcolo utilizzati, al crescere dello strato di intonaco le differenze di temperatura superficiale tra materiali diversi tendono a diminuire e alla fine tutte convergono verso lo stesso valore di  $45^\circ\text{C}$ , che rappresenta inoltre la temperatura assunta dal solido semi-infinito costituito da malta.

Da fig. 3 si può notare inoltre che tutti i materiali con diffusività termica inferiore alla malta presentano temperature superiori con andamenti ordinati nel senso delle diffusività crescenti, mentre considerazioni opposte possono essere fatte per materiali più diffusivi della malta. Una conferma sperimentale si può avere osservando l'immagine termografica in fig. 1. Dall'analisi di fig. 4, questo ordine negli andamenti della temperatura, in accordo con le diffusività dei singoli materiali, non è rispettato soprattutto per quelli più diffusivi.

Dall'analisi delle figg. 4 e 5 si nota inoltre che la differenza tra la temperatura superficiale della malta e degli altri materiali diminuisce al crescere dello strato di intonaco. Tale differenza, che rappresenta il contrasto termico determina la nitidezza dell'immagine termografia. In fig. 5 sono riportati gli errori percentuali commessi dal metodo ibrido rispetto a quello alle differenze finite sulla stima della temperatura superficiale letta dopo tre ore di riscaldamento. Si può notare come per materiali più diffusivi della malta l'errore sia per lo più costante al crescere dello strato di intonaco, fino comunque a convergere ad un valore del 45%. Comunque tali materiali sono quelli che per spessori di intonaco inferiore ai 2 cm presentano errori minori e dell'ordine del 20% nel caso del basalto o del 60 % nel caso tufo. Materiali non omogenei come l'abete e i laterizi sia semipieno che forato, presentano errori elevati confermando che la schematizzazione fatta nel modello di calcolo utilizzato non è accettabile.

Analogamente sono stati valutati gli errori commessi dal metodo ibrido rispetto a quello alle differenze finite sul contrasto termico misurato dopo 3 ore di riscaldamento.

Considerando non attendibili gli andamenti relativi ai materiali disomogenei, si nota che seppure gli errori commessi siano generalmente molto elevati, tuttavia essi crescono al decrescere della differenza di diffusività tra la malta e il materiale in esame e sono indipendenti dallo spessore dello strato di intonaco. Per il tufo infatti l'errore si assesta intorno al 15%, mentre per la lava esso è superiore al 100% e per il basalto addirittura superiore al 300%. Si può concludere che il metodo ibrido non sempre può fornire valutazioni preliminari attendibili e che attualmente non può essere utilizzato come elemento quantitativo di predizione sul comportamento di una parete reale sottoposta ad un flusso radiante, ma esclusivamente come strumento di confronto preliminare.

In fig. 6 è invece riportato l'andamento dell'"appearing time" per tutti i materiali al variare dello spessore, calcolato con il metodo alle differenze finite.

Dall'analisi di tale figura è possibile rilevare che ad esempio, nel caso di una parete sovrastata da un intonaco di spessore pari a 2 cm, il primo materiale che compare nell'immagine termografica è il tufo che presenta un contrasto

termico di 1,5 K dopo 30 minuti, in successione appariranno il granito, la lava e il basalto (55 minuti). Dopo circa 2 ore e 30 minuti apparirà un elemento di cls ed infine dopo più di 4 ore apparirà anche il laterizio pieno. Tali tempi di somministrazione aumentano con l'aumentare dello spessore così come aumenta anche l'intervallo temporale di comparsa, utile per distinguere i diversi materiali.

E' possibile concludere quindi che il tempo di comparsa può essere uno strumento utile per riconoscere il materiale sottostante l'intonaco e diagnosticare la composizione del paramento murario con indagini completamente non distruttive. Un ampio lavoro di classificazione preventiva sia numerica che sperimentale deve essere comunque fatto.

## CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati proposti due modelli di calcolo per la simulazione di pareti intonacate sottoposte ad un flusso termico radiante diffuso. I due modelli di calcolo prevedono la schematizzazione di una parete tipo con il metodo alle differenze finite esplicito per tutti gli strati del solido composto, e di un metodo ibrido che prevede la schematizzazione alle differenze finite solo per lo strato di intonaco, mentre l'utilizzo del modello del solido semiinfinito per la schematizzazione della parete sottostante.

Lo scopo è quello di fornire strumenti numerici per la stima di temperature assunte dalla parete, contrasti termici e tempi di comparsa di un contrasto termico di 1,5 K per diversi casi di materiali utilizzati all'interno della struttura. Questi strumenti permettono di poter classificare il comportamento di una parete sottoposta ad una diagnosi termografica attiva effettuata con un riscaldatore radiante.

I due metodi di calcolo sono stati confrontati su tutti i parametri di interesse al crescere dello strato di intonaco. E' possibile concludere che il metodo "ibrido" fornisce risultati non sempre attendibili dal punto di vista quantitativo e errori di predizione elevati soprattutto nella stima del contrasto termico. Attualmente può essere utilizzato solo in fase di indagine preliminare. Il metodo alle differenze finite invece ha presentato incoraggianti riscontri sperimentali.

Dai risultati emersi con questo lavoro è possibile concludere inoltre che, con una diagnosi termografica attiva in transitorio, osservando i tempi di comparsa di ogni singolo materiale, è possibile riconoscere il tipo di elemento costruttivo costituente la parete.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. ISO 9869 Thermal insulation –Building elements – In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, International standard, 1994-08-01.
2. Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Monitoring of ancient buildings by thermal method. *Journal of Cultural Heritage*, 3 (2002) 21-29.
3. Grinzato E., Vavilov V., Kauppinen T., Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, 29 (1998) 1-9.
4. Maldague X., Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. J. Wiley & Sons, NY, 2001.
5. Fantozzi F., Leccese F., Filippeschi S., Analisi termografica delle irregolarità di involucro della Chiesa di S. Giulia in Livorno. Progetto di ricerca cofinanziato dall'Arciconfraternita di S. Giulia (Livorno), Dip.to di Energetica "L. Poggi", Università di Pisa, 2003-2005.
6. Latrofa E.M., Filippeschi S., Analisi termografica delle irregolarità di involucro di Villa Baciocchi in Capannoli. Progetto di ricerca cofinanziato dal Comune di Capannoli (Pisa), Dip.to di Energetica "L. Poggi", 2003.
7. Filippeschi S., Leccese F., "Infrared thermography to visualize the texture of historical buildings in Tuscany" 8th International Conference on Non-Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage, Lecce (Italy), 15 - 19 May 2005.
8. Incropera F. P., De Witt D. P., Fundamental of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons inc., N. Y., 1990.
9. Vavilov V., Kourtenkov D. G., Grinzato E., Bison P.G., Marinetti S., Bressan C., Inversion of experimental data and athermal tomography using Thermo, Heat and thermidge software. Eurotherm Seminar 42, QIRT 94, Paris (F), pp. 273-278.
10. CNR, Repertorio delle caratteristiche termofisiche dei componenti edilizi opachi e trasparenti. Roma, 1982.
11. UNI 10351, Building materials – Thermal conductivities and vapour permeabilities, Marzo 1994.
12. Santini T., Impiego della Termografia nella Diagnostica delle Costruzioni Murarie Storiche: Metodologie ed Esempi, Tesi di Laurea in Ing. Civile, Univ. di Pisa, Ottobre 2006.

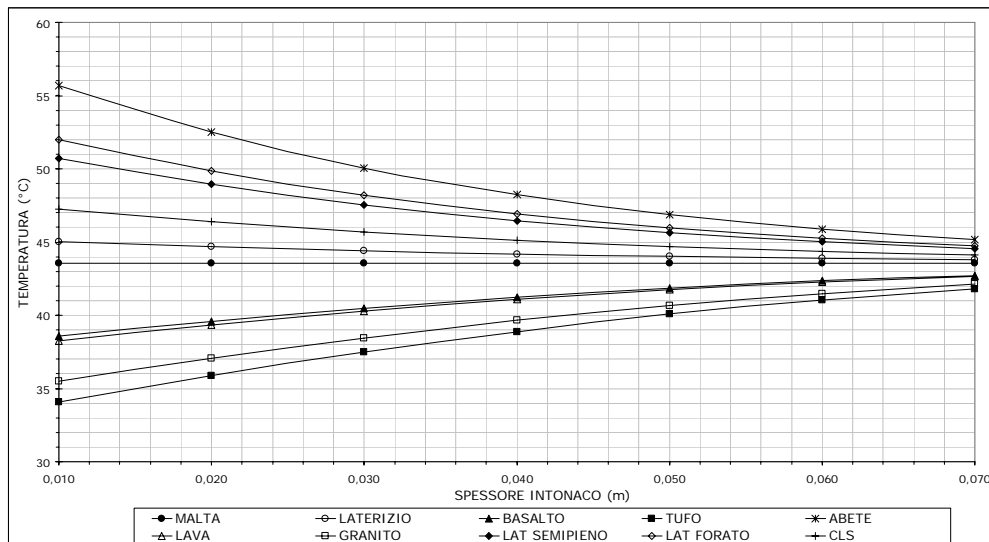


Fig. 3: Schematizzazione DFE: temperatura del nodo di superficie per diversi spessori dello strato di intonaco dopo 3 ore di riscaldamento

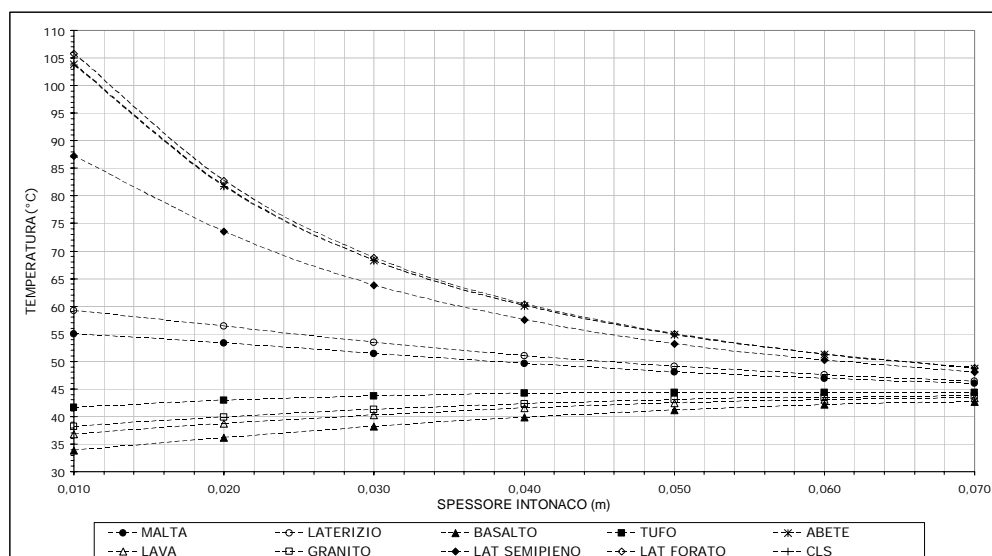


Fig. 4: Schematizzazione 'IBRIDA': temperatura del nodo di superficie per diversi spessori dello strato di intonaco dopo 3 ore di riscaldamento

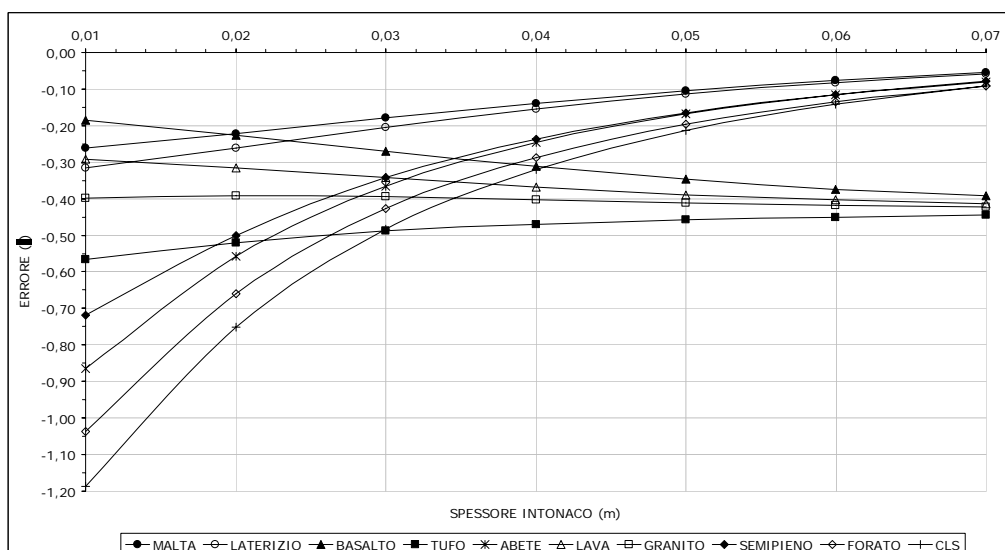


Fig. 5: Errore sulla temperatura commesso, trascorse tre ore, utilizzando la schematizzazione ibrida

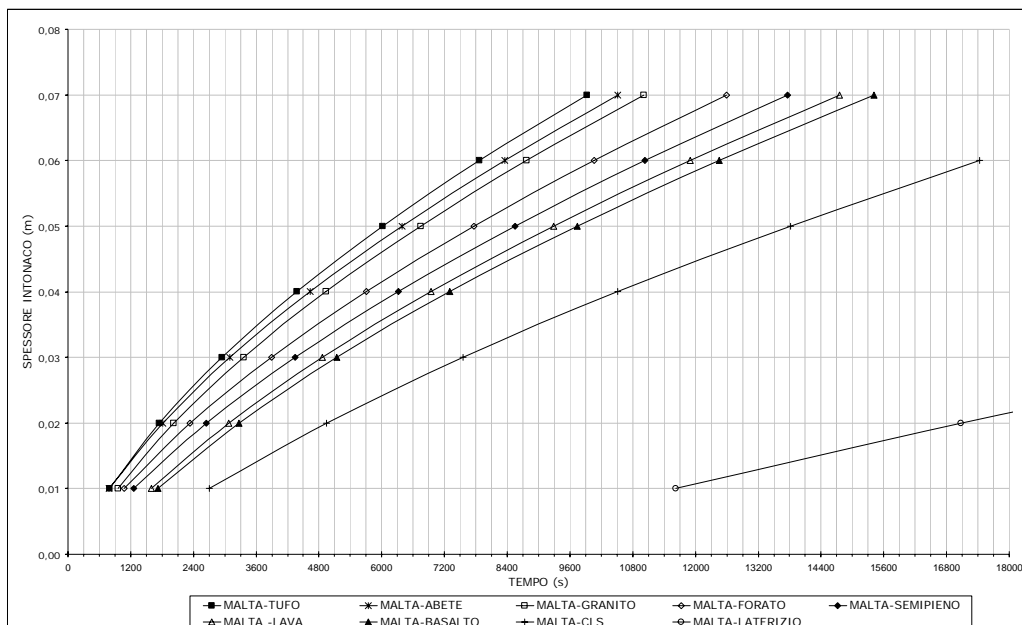


Fig. 6: Schematizzazione DFE: tempo necessario perché si raggiunga un  $CT=1,5^{\circ}C$  al variare dello spessore dello strato di intonaco



## IMPIANTI DI CONDIZIONAMENTO PER TORRI DI CONTROLLO DEL TRAFFICO AEREO

R. de Lieto Vollaro<sup>1</sup>, A. Vallati<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Roma “La Sapienza”, Via Eudossiana 18, 00184- Roma

### SOMMARIO

In questo lavoro, utilizzando i risultati ottenuti da un'analisi numerica e realizzando una campagna di misure sperimentali preliminare all'interno di alcune Torri di Controllo di aeroporti italiani, differenti per dimensioni e tipologia, si è giunti a proporre un impianto di condizionamento che preveda un nuovo sistema di distribuzione dell'aria al fine di garantire quelle condizioni di comfort necessarie in quegli ambienti di lavoro come le TWR dove si svolgono attività che richiedono un'elevata attenzione e concentrazione.

Lo studio per ottimizzare il benessere termoigrometrico all'interno delle Torri di Controllo è nato da una collaborazione tra l'Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo, ed il Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma “La Sapienza”.

La necessità dell'Ente Nazionale Italiano di Assistenza al Volo di garantire condizioni ottimali di lavoro in ambienti confinati particolari per geometria, costituzione ed attività svolta, come le sale operative delle Torri di Controllo per il traffico aereo, impone di stabilire dei criteri generali assai precisi per gli impianti tecnologici al loro servizio. A tal fine assume notevole rilevanza la valutazione dell'ambiente termico in cui l'uomo si trova ad operare e, in particolare, la determinazione di alcuni fattori ambientali come la temperatura, l'umidità relativa, la velocità dell'aria, la temperatura media radiante delle pareti. È proprio attraverso la valutazione di questi parametri, infatti, che si può stabilire se le condizioni microclimatiche ottenute in ambiente consentiranno di garantire condizioni di comfort termico oppure no.

La particolare configurazione delle Torri di Controllo, il tipo di attività che vi si svolge e la presenza di delicate apparecchiature elettroniche impongono che lo studio sia condotto in modo non tradizionale, utilizzando l'analisi numerica come strumento di ottimizzazione dei parametri fondamentali per ottenere condizioni di comfort in ambiente. L'utilizzo dell'analisi numerica in fase di progettazione permette di analizzare diverse tipologie di distribuzione dell'aria, in modo da ottenere in ogni punto della zona occupata le condizioni di confort termoigrometrico. È stato inoltre verificato il comportamento di diversi terminali al fine di ottenere un buon lavaggio dell'ambiente, tenendo sotto controllo la velocità massima dell'aria in prossimità degli occupanti.

Per scegliere la posizione e la tipologia dei terminali per la diffusione dell'aria sono stati utilizzati anche i vari indici indicati dalla normativa vigente: Draught Risk (DR), PMV, PPD, con i quali si sono ottenute informazioni utili sull'efficacia della ventilazione nell'ambiente oggetto dello studio.

Si è potuto verificare infine come l'impiego di simulazioni termofluidodinamiche è di fondamentale importanza per un'ottimale progettazione di un sistema di distribuzione dell'aria per ambienti non convenzionali quali possono essere definiti le Torri di Controllo, permettendo inoltre di ridurre i tempi ed i costi relativi alla fase progettuale.

### ANALISI NUMERICA

Il modello matematico implementato per l'ottimizzazione del sistema di distribuzione dell'aria all'interno delle Torri di Controllo è stato costruito mediante l'utilizzo del software di simulazione numerica (Fluent release 6.1).

Questo modello utilizza il metodo ai volumi finiti per la discretizzazione del dominio, e per la soluzione dei flussi d'aria un sistema di equazioni (equazione di continuità, equazioni di Navier-Stokes e l'equazione dell'energia) che governano i flussi tridimensionali in coordinate cartesiane. Per ottenere la soluzione approssimata del sistema di equazioni occorre definire due equazioni che modellino la turbolenza. Si è scelto come modello di turbolenza il modello k-ε standard, da più tempo utilizzato e validato per questo tipo di flussi d'aria (Chen et altri 1990), dove l'energia cinetica turbolenta e la dissipazione turbolenta vengono esplicitate mediante due parametri (k e ε). Nelle zone prossime alle pareti, dove i gradienti del flusso sono molto grandi e la viscosità turbolenta non è dominante, il modello k-ε non è applicabile, in quanto valido per alti numeri di Reynolds, quindi tali zone sono state trattate utilizzando il “Wall Function Method”.

È stata utilizzata una mesh strutturata tridimensionale con elementi esaedrici e l'algoritmo SIMPLE per risolvere le

equazioni differenziali (Patankar, 1980). Particolare attenzione nella discretizzazione del dominio è stata posta nelle zone con forti gradienti di pressione. Sono stati aumentati quindi il numero dei nodi nella zona d'ingresso dell'aria e nelle zone di uscita in quanto i gradienti di velocità e pressione qui sono molto elevati.

L'accuratezza dei risultati, come noto, è influenzata in parte dal numero dei nodi utilizzati per discretizzare il dominio. È stato quindi eseguito il test della dipendenza della griglia per selezionare una mesh con un numero di nodi minimo, tale che sia soddisfatta l'accuratezza della soluzione. Nel test di dipendenza della griglia, si sono utilizzate griglie con un numero di nodi sempre maggiore per arrivare a circa 1.000.000 di nodi, quando si è notato un aumento insignificante nell'accuratezza della soluzione all'aumentare dei nodi.

Si è notato infatti come risultati con una buona accuratezza vengono trovati già per un numero di nodi pari a 300.000 circa.

Per la convergenza della soluzione si è utilizzato il criterio per cui l'errore relativo, definito come la differenza tra il valore di ciascuna variabile in due successive iterazioni sia minore del valore di 10<sup>-3</sup> della variabile in questione, monitorando comunque per ogni iterazione il valore della

pressione all'ingresso e all'uscita dell'aria nell'ambiente unitamente ai valori della portata.

Le condizioni al contorno utilizzate per la soluzione del sistema di equazioni differenziali sono: una superficie all'interno del canale di immissione dell'aria distante 5 diametri dagli elementi terminali dell'impianto aeraulico, nel nostro caso microugelli, in cui viene definita la portata in massa di progetto, un'estrazione simulata all'interno del canale di ripresa con una superficie in cui si ipotizza che il flusso d'aria sia completamente sviluppato, quindi una serie di superfici solide delimitanti l'ambiente a cui è stato attribuito il relativo coefficiente di adduzione esterno. Il valore dell'energia cinetica turbolenta ( $k$ ) nelle sezioni di ingresso ed uscita è stata posta uguale al 10% e la lunghezza tipica della dissipazione turbolenta ( $\epsilon$ ) è stata posta uguale ai rispettivi diametri idraulici.

## RISULTATI OTTENUTI

Il problema del confort all'interno delle Torri di Controllo è assai delicato per l'attività che vi si svolge; la distribuzione dell'aria in ambienti di questo tipo è senza dubbio uno degli aspetti più critici. Le condizioni di confort per i lavoratori sono affidate all'impianto di climatizzazione, del tipo ad aria primaria e fancoils a 4 tubi, in cui il sistema di ventilazione meccanica installato riveste una notevole importanza, come dimostrano anche i risultati di un sondaggio effettuato tra un numero elevato di addetti al traffico aereo.

Sono state effettuate numerose simulazioni, per ottimizzare la distribuzione dell'aria all'interno della Torre di Controllo. La migliore soluzione individuata per l'immissione dell'aria all'interno della TWR è stata quella di un terminale ad alta induzione, in particolare a microugelli, che permette grazie all'effetto induttivo di limitare le correnti d'aria fastidiose nella zona occupata e allo stesso tempo di effettuare un buon lavaggio dell'ambiente. Questo tipo di soluzione permette di limitare gli effetti radianti dovuti alla presenza di estese pareti vetrate, che in un ambiente come questo sono molto importanti.

Inoltre, la possibilità di personalizzare il getto dell'aria dà all'operatore la possibilità di variare la distribuzione locale dell'aria a proprio piacimento senza alterare la distribuzione generale data la ridotta portata del singolo microugello (5 m<sup>3</sup>/h). In definitiva si ritiene che questa soluzione, la quale in parte ripete soluzioni già adottate in altri casi (aerei, navi, sale operatorie, carrozze ferroviarie) unita ad un efficiente impianto di climatizzazione possa dare ai controllori di volo condizioni termoisometriche più idonee a svolgere correttamente la loro difficile attività.

Si riportano delle immagini relative ai risultati della simulazione numerica effettuata.

Nelle Figure 1, 2 sono evidenti le linee di isovelocità su un piano verticale passante per la mezzeria del terminale di distribuzione dell'aria; queste figure, come del resto tutte le altre che presentano i risultati ottenuti con l'analisi numerica, sfruttano le simmetrie dell'ambiente in esame ed è quindi visualizzato solo un quarto dell'ambiente complessivo.

Nella Figura 3 invece sono evidenti le linee di isovelocità su un piano orizzontale posto ad un'altezza di 1,5 m dal pavimento che rappresenta quindi un piano appartenente alla zona occupata dalle persone. In questo piano è importante notare come la velocità sia limitata e rientri nel limite normativo del confort ( $v < 0,2$  m/s) assicurando altresì un buon lavaggio dell'ambiente.

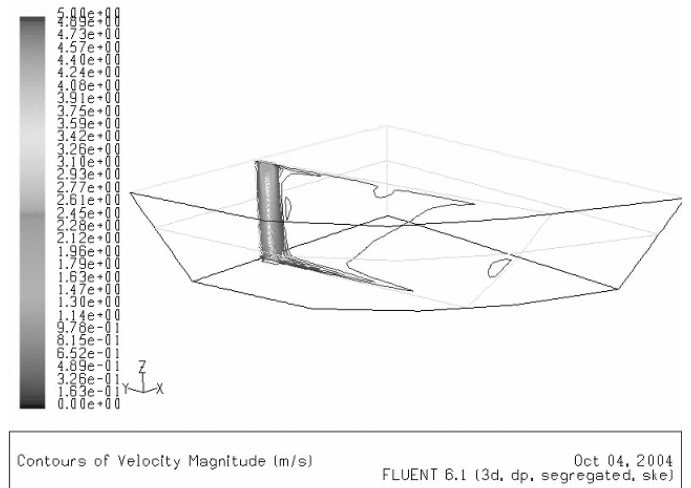


Figura 1 - Linee di isovelocità su un piano verticale passante per la mezzeria di uno dei diffusori previsti

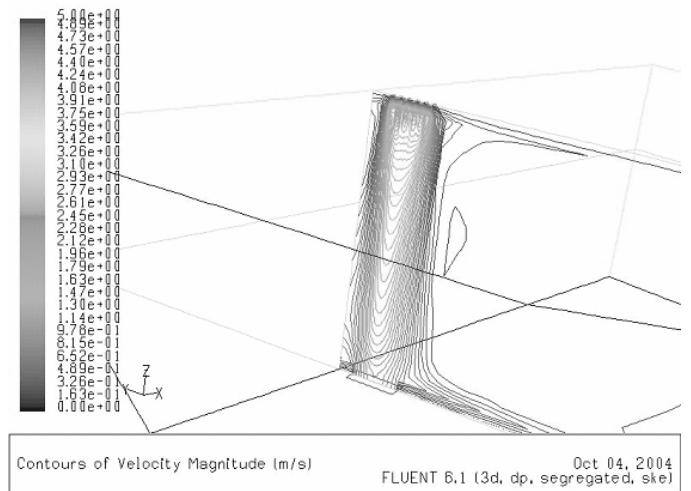


Figura 2 - Particolare delle linee di isovelocità su un piano verticale passante per la mezzeria di uno dei diffusori di distribuzione dell'aria previsti.

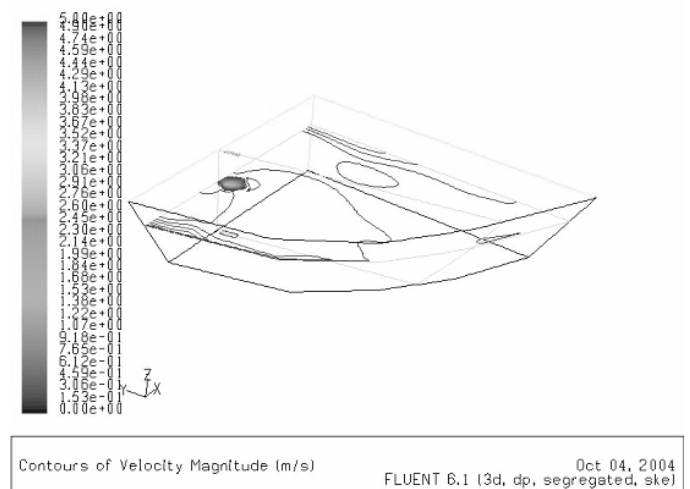


Figura 3 - Linee di isovelocità su un piano orizzontale ( $h=1,5$  m) rappresentativo della zona occupata dalle persone. Gli atti saranno stampati con metodo digitale.

Nelle Figure 4 e 5 invece sono evidenti i vettori velocità in uscita dal terminale di diffusione dell'aria e rappresentati su un piano verticale che passa per la mezzeria del terminale stesso. In entrambe le suddette figure si nota l'effetto induttivo di questi terminali che consente di ottenere un ottimo lavaggio dell'ambiente, limitando allo stesso tempo fastidiose correnti d'aria e quindi velocità dell'aria troppo elevate nella zona occupata dalle persone. In questa tipologia di ambienti, in cui è richiesta un'enorme attenzione all'operatore, occorre limitare quanto più possibile eventuali disagi termoigrometrici dovuti ad una non corretta distribuzione dell'aria all'interno dell'ambiente che, soprattutto d'estate, causa il problema delle correnti d'aria.

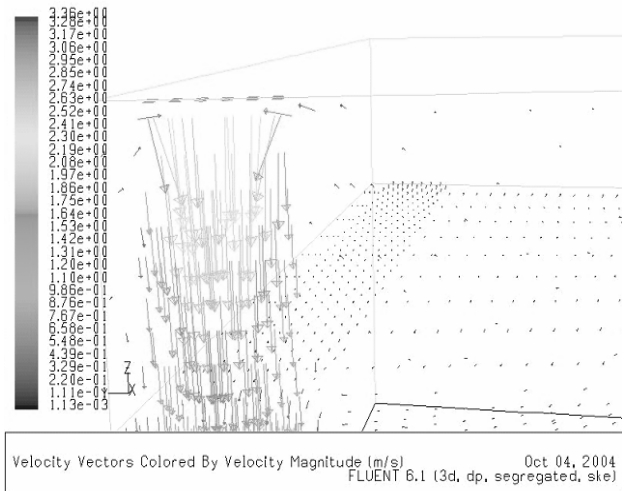


Figura 4 - Particolare dei vettori della velocità dell'aria in uscita dal diffusore

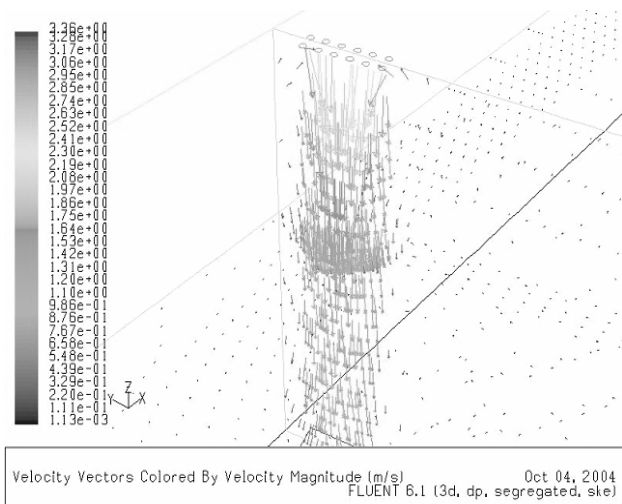


Figura 5 - Particolare dei vettori della velocità dell'aria in uscita dal diffusore.

## IMPIANTO PROPOSTO

Per la Torre di Controllo tipo è stato previsto un impianto misto ad aria primaria e fancoils a quattro tubi, che opera suddividendo i controlli delle grandezze termoigrometriche e di purezza dell'aria su due componenti differenziate:

- ad un sistema centralizzato per il trattamento e la

distribuzione dell'aria primaria, viene demandato il controllo della purezza dell'aria e dell'umidità relativa;

- ad un impianto a fancoils a quattro tubi, posizionati in prossimità delle vetrate della TWR, viene demandato il controllo del carico termico sensibile.

L'aria trattata dall'impianto è solamente quella esterna di ventilazione; ciò comporta la distribuzione di portate ridotte rispetto ad un impianto a tutt'aria, con minori problemi per quanto riguarda gli ingombri sia delle canalizzazioni e sia dell'unità centralizzata di trattamento dell'aria. Anche quest'ultimo aspetto delle dimensioni dell'impianto non è trascurabile quando si ha a che fare con TWR, quindi ambienti posti ad altezze alcune volte considerevoli, le cui dimensioni non potranno essere quindi aumentate senza far lievitare notevolmente i costi di costruzione.

L'impianto a fancoils è del tipo a quattro tubi, poiché la presenza di grandi vetrate non apribili ed elevati carichi termici sensibili da sottrarre nel periodo medio stagionale, richiedono di avere a disposizione per i fancoils acqua refrigerata anche nel periodo delle medie stagioni.

L'aria, come detto tutta esterna, subisce i processi di trattamento estivi ed invernali tipici di in un normale impianto a tutt'aria del tipo a punto fisso e post-riscaldamento. L'aria primaria, dopo aver subito i trattamenti è convogliata e distribuita in ambiente mediante un sistema di canalizzazioni dimensionate a bassa velocità.

Il controllo termico in ambiente è affidato ad unità locali, i fancoils, dislocati in punti opportuni della TWR e del tipo in vista ed a pavimento. L'impianto, del tipo a quattro tubi; infatti i fancoils sono alimentati da una rete di dell'acqua calda ed una dell'acqua refrigerata provenienti dalla centrale termica e dalla centrale frigorifera.

I fancoils operano il controllo mediante valvole miscelatrici automatiche pilotate da un termostato ambiente posizionato a bordo macchina.

Mediante una serie di sonde il sistema di controllo ha la possibilità di modulare le valvole a tre vie poste sull'ingresso di ciascuna batteria di raffreddamento, preriscaldamento e post-riscaldamento, oltre che comandare l'umidificatore ed il ventilatore dell'unità di trattamento dell'aria.

La regolazione di tipo elettronico modulante con unico modulo regolatore per tutte le grandezze fisiche dovrà, infatti, regolare i valori di temperatura e di umidità relativa dell'aria immessa in ambiente, la chiusura e apertura della serranda sulla presa d'aria esterna segnalando lo stato dei filtri, i valori di temperatura e di umidità esterna e dell'aria immessa, che potranno essere modificati a piacimento. La temperatura ambiente viene controllata mediante regolatore da mobiletto che opera in sequenza sulle due valvole a tre vie dei fan-coils a doppia batteria.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro si è voluto esaminare dapprima le problematiche delle Torri di Controllo per quanto riguarda le condizioni termoigrometriche interne, attraverso un'indagine preliminare compiuta in alcuni siti che rappresentavano le principali tipologie dimensionali, nei quali sono state eseguite misure per la determinazione del Voto Medio Previsto (PMV) e della Percentuale di Insoddisfatti (PPD) e di qualità dell'aria.

Successivamente sono stati esaminati le tipologie di impianto migliore che ottimizzi i parametri relativi al comfort ambientale interno e si è quindi descritto il tipo di impianto scelto.

Lo scopo del lavoro è stato quello di scegliere soluzioni adatte ad ambienti particolari come quelli delle Torri di Controllo, ma allo stesso tempo semplici ed affidabili in modo da ridurre al minimo la manutenzione e limitare quanto più possibile eventuali guasti che in un funzionamento continuo creano disagi notevoli.

Il modello matematico e le varie risposte ottenute con varie simulazioni numeriche effettuate ci hanno poi convinto che in ambienti esposti alla radiazione solare, mediante pareti vetrate su tutte le direzioni, l'esigenza fondamentale è quella di poter controllare la temperatura nelle quattro zone in cui idealmente può essere divisa una Torre di Controllo, in modo da minimizzare l'effetto della temperatura media radiante.

Per motivi analoghi si è pensato di controllare i flussi d'aria nelle zone ideali della sala operativa scegliendo dei diffusori che possano orientare il flusso d'aria nella zona occupata e personalizzare così le condizioni di comfort interno. La scelta di una ventilazione personalizzata è infatti una scelta progettuale che in un ambiente sottoposto a differenti esigenze termiche consente di raggiungere meglio l'obiettivo del comfort. Si sono scelte dei diffusori a microugelli orientabili disposti lungo il perimetro della zona occupata dalle persone che come è messo in evidenza dalle simulazioni effettuate potranno soddisfare le esigenze di comfort dei lavoratori limitando fastidiose correnti d'aria.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. ASHRAE. Handbook Fundamentals 2001. Space Air Diffusion, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
2. Bruun H.H. Hot-wire anemometry. Principles and signal analysis. Oxford University Press 1995, New York.
3. Chen Q., Moser A. 1991. Simulation of a multiple nozzle diffuser. Proceedings of the 12th AIVC Conference, Vol.2, pp.1-14
4. Chow W.K., Wong L.T. 1997. Design of Air Diffusion Terminal Devices in Passenger Train Vehicle. Journal of Environmental Engineering, 1997, pp.1203-1207
5. EN 13129-1. Railway applications – Air Conditioning for main line rolling stock – Part.1: Comfort parameters.
6. Etheridge D., Sandberg M., 1996. Building Ventilation. Theory and Measurements. John Wiley & Sons, Chichester, 1996 pp.391-446.
7. Fanger P.O., Melikov A.K., Hanzawa H. and Ring J.1988. Air Turbulence and Sensation of Draught. Energy and Buildings, vol. 12 (1998) pp. 21-39
8. S. Grignaffini, A. Vallati. Design of Air Distribution System in A Train Coach Dedicated To Sick Persons. Proceedings of the Roomvent 2002 Air Distribution in Rooms. Eighth International Conference. Copenhagen Denmark 8-11 September 2002.
9. S. Grignaffini, A. Vallati. Experimental And Numerical Studies On Air Diffusion In A Single Office. Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Monterey, California June30-July5, 2002 pp.308-313.
10. ISO Standard 7730, Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Standards Organization (1997)
11. Hanzawa H., Melikow A. K. and Fanger P.O. 1987. Airflow characteristics in the occupied zone of ventilated spaces. ASHRAE Transactions 93, pp.524-539.
12. Patankar S.V. 1980. Numerical Heat transfer and fluid flow. Washington, Hemisphere publishing corporation.
13. Thorshauge J., 1982. Air velocity fluctuations in the occupied zone of ventilated space. ASHRAE Transactions 88, pp.753-763.
14. UNI EN 27726. Thermal environments-Instruments and methods for measuring physical quantities.
15. UNI EN 13182. Ventilation for buildings – Instrumentation requirements for air velocity measurements in ventilated spaces.
16. Zhivov A.M., Zhang J.S., Christianson L.L. Characteristics of diffuser air jets and airflow in the occupied regions of mechanically ventilated rooms-a literature review. ASHRAE Transactions 99. Vol.99, Pt 1. pp.1119-1127.

**SESSIONE**

**EFFICIENZA DEI PROCESSI  
DI CONVERSIONE ENERGETICA**



## METODI DI VALUTAZIONE DEGLI SCAMBI TERMICI TRA SUOLO E ARIA NEI CONDOTTI INTERRATI.

Giorgio Galli<sup>1</sup>, Franco Cipriani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Fisica Tecnica – Università “La Sapienza” – Roma

<sup>2</sup>Facoltà di Architettura “L. Quaroni” – Università “La Sapienza” – Roma

### SOMMARIO

Due fattori hanno una sempre maggiore rilevanza negli ultimi anni, da un lato il problema economico e ambientale della produzione, della distribuzione e del consumo dell'energia, dall'altro i crescenti fabbisogni correlati agli attuali standard delle condizioni di vita. In tale scenario risultano importanti tutte le misure che contribuiscano a ridurre i consumi di energia e/o ad aumentare l'efficienza dei sistemi impiantistici. Nell'ambito del condizionamento degli ambienti si sono imposti all'attenzione i condotti interrati.

Nelle ricerche che riguardano gli scambi termici tra i tubi interrati e il suolo circostante è di fondamentale importanza stabilire la temperatura nell'interfaccia tra suolo e fluido. Tale temperatura risulta essere essenziale per determinare in modo affidabile le prestazioni del sistema e quindi il suo potenziale impiego, in quanto determina direttamente la temperatura di uscita dell'aria.

Nei molteplici modelli di valutazione elaborati a questo proposito tale temperatura può assumere differenti valori che variano da quello del terreno indisturbato, a quello variabile determinato per mezzo di algoritmi numerici complessi basati sul metodo delle differenze finite, in grado di tenere conto delle diverse variabili (ad esempio la variazione di umidità nel terreno e nell'aria).

Nel presente lavoro vengono considerati alcuni metodi analitici che tengono conto delle proprietà termofisiche del suolo e delle caratteristiche dinamiche e termiche del fluido. Questi metodi, sebbene semplificati, consentono di valutare in prima approssimazione lo scambio termico tra il suolo e l'aria nel condotto interrato.

### 1. INTRODUZIONE.

Nelle attuali condizioni della progettazione impiantistica determinate dal mercato dell'energia, ma anche da una sempre maggiore sensibilità verso l'ambiente, vanno assumendo una importanza ed una rilevanza via via più spiccata tutte quelle tecnologie e soluzioni che consentono di produrre energia a partire da fonti rinnovabili o che riducono il consumo energetico in modo significativo. Molte di tali misure sono note e studiate accuratamente anche da decenni, per esse è disponibile una vasta ed esaustiva letteratura, modelli di calcolo e spessissimo anche softwares applicativi. Altre soluzioni risultano invece esaminate con minore completezza, tra esse sono compresi i sistemi di scambio termico con il terreno. In effetti a questo riguardo deve essere introdotta una distinzione tra gli scambiatori terra-aria e gli scambiatori terra-acqua.

I primi sono tipicamente costituiti da tubazioni di grande diametro (200-300 mm) interrate orizzontalmente (ad una profondità in genere compresa tra 1,5 e 2 m) entro cui passa aria presa dall'ambiente esterno. Il moto dell'aria può avvenire sia naturalmente, sia in modo forzato, quest'ultima soluzione è quella maggiormente adottata in quanto consente di determinare con precisione la portata e assicurarne la costanza. L'aria passata attraverso i condotti viene normalmente immessa negli ambienti serviti, il circuito è pertanto di tipo aperto. I modelli di calcolo riferiti a questa soluzione [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8], sebbene abbastanza numerosi, appaiono spesso basati su ipotesi o modalità semplificative che lasciano qualche dubbio sulla completezza della rappresentazione dei fenomeni e sulla precisione nel determinare le quantità energetiche in rapporto al loro funzionamento.

Infatti [8] in molti casi viene assunta come temperatura del terreno a contatto del condotto il valore stagionale del campo termico in assenza del condotto stesso (temperatura del terreno indisturbato). In altri casi vengono prese in considerazione più variabili, in particolare:

- in [5] è proposto un modello numerico di sufficiente accuratezza, che tiene conto sia della capacità termica del terreno, sia della sua umidità, presentando però risultati di simulazione per periodi piuttosto limitati (dell'ordine di 15 giorni);
- in [4] viene tenuto conto dell'influenza dello scambio termico nel condotto sull'andamento della temperatura nel terreno limitatamente al regime stazionario e ad una zona di terreno di estensione pari al raggio del tubo.

I secondi, che vengono utilizzati ad integrazione delle pompe di calore con una tecnologia applicata diffusamente da oltre trenta anni, sono generalmente costituiti da tubi di piccolo diametro (in genere 1") interrati in vario modo, ma per la maggior parte delle volte sono contenuti in sonde verticali che contengono due tubazioni affiancate, raggiungendo profondità variabili, ma di solito comprese tra gli 80 e i 150 m. Nei tubi scorre acqua (o una miscela di acqua e glicole), ma a differenza degli scambiatori terra-aria il circuito realizzato è chiuso, infatti l'acqua che vi passa serve come mezzo di scambio termico per le pompe di calore. Gli scambiatori terra-acqua sono stati analizzati tecnicamente e scientificamente in maniera assai approfondita [9] [10] [11] [12] [13] [14], tuttavia i relativi modelli non risultano direttamente trasferibili a quelli terra-aria per le peculiarità che li differenziano, parte delle quali sono deducibili dalle sintetiche descrizioni precedenti.

In questo lavoro ci si propone di verificare la validità

dell'ipotesi che negli scambiatori terra-aria il terreno riesca a svolgere efficacemente e a mantenere nel tempo la sua funzione di volano termico. Ciò viene fatto impiegando alcuni modelli analitici basati sulle ipotesi seguenti:

- le geometrie di riferimento siano semplici (geometria piana e cilindrica);
- la temperatura dell'aria vari in modo perfettamente periodico;
- l'impianto funzioni in modo continuo, così da poter considerare che il terreno raggiunga le condizioni di regime periodico stabilizzato;
- la trasmissione del calore nell'intorno del condotto non venga influenzata dagli scambi termici tra superficie del terreno e ambiente esterno.

## 2. CASO DI GEOMETRIA PIANA.

L'assunto di partenza è che il condotto sia compreso tra due superfici piane indefinite e parallele a quella del terreno e che il terreno scambi calore con un flusso d'aria che si trovi ad una temperatura data da:

$$T_a = T_m + \theta_a \text{sen}(\omega t + \varepsilon) \quad (1)$$

Si suppone che la temperatura del terreno indisturbato sia pari a  $T_m$ , pertanto ponendo:

$$V = T - T_m$$

si avrà che il campo termico a regime periodico stabilizzato è la soluzione dell'equazione di Fourier monodimensionale che per  $x = 0$  soddisfa la condizione al contorno:

$$\lambda \frac{\partial V}{\partial x} = h(V - \theta_a \text{sen}(\omega t + \varepsilon)) \quad (2)$$

dato da [15]:

$$V = \frac{\theta_a \frac{h}{\lambda}}{\sqrt{\left(\frac{h}{\lambda} + \beta\right)^2 + \beta^2}} e^{-\beta x} \text{sen}(\omega t + \varepsilon - \beta x - \delta) \quad (3)$$

dove:

$h$  = trasmittanza delle pareti del condotto data da:

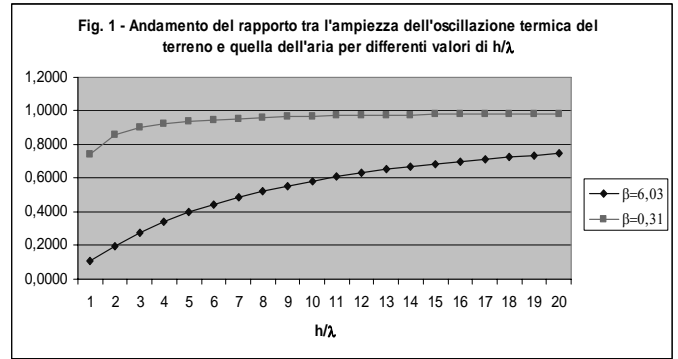
$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_c} + \frac{s}{\lambda_i}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2D}}$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{\beta}{\frac{h}{\lambda} + \beta}\right)$$

L'interazione termica tra aria e terreno è determinata essenzialmente dal valore della temperatura del terreno a contatto del condotto.

Come si vede dalla fig. 1 per le oscillazioni diurne ( $\beta$  dell'ordine di  $6 \text{ m}^{-1}$ ) le oscillazioni della temperatura nel terreno risultano fortemente smorzate rispetto al quelle dell'aria, invece per le oscillazioni annuali ( $\beta$  dell'ordine di  $0,3 \text{ m}^{-1}$ ), il terreno tende ad assumere nelle sue oscillazioni valori quasi uguali a quelli dell'aria.



Come espresso in [15] il termine che rappresenta il transitorio della temperatura (transiente termico) per valori elevati di  $t$  è dell'ordine di:

$$T_{trans} \cong \frac{\lambda \theta_a}{h \omega t \sqrt{Dt}} \quad (4)$$

pertanto il tempo che deve trascorrere dall'attivazione dell'impianto, per il raggiungimento delle condizioni di regime periodico stabilizzato, deve essere tale da soddisfare la condizione seguente

$$t^{\frac{3}{2}} \gg \frac{2\pi\lambda}{\omega h \sqrt{D}} \quad (5)$$

dalla quale si osserva che nel caso dell'oscillazione diurna e per valori ordinari di  $\lambda$ ,  $h$  e  $D$  è necessario un periodo di circa una decina di giorni, mentre nel caso dell'oscillazione annuale è richiesto almeno un anno di funzionamento.

## 3. CASO DI GEOMETRIA CILINDRICA.

L'assunto di partenza è in questo caso più prossimo alla condizione reale, è cioè rappresentativo di un condotto di dimensioni finite, consideriamo quindi il campo termico in regime periodico stabilizzato in una zona di terreno intorno ad un cilindro di raggio esterno  $a$ . Come nel caso piano la temperatura del terreno è ipotizzata uguale a quella indisturbata  $T_m$ , mentre quella del fluido  $T_a$  è data dalla:

$$T_a = T_m + \theta_a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (6)$$

ponendo:

$$V = T - T_m = \text{Re}(V_0 e^{i(\omega t + \varepsilon)}) \quad (7)$$

in cui  $V_0$  è la soluzione della:

$$\frac{d^2 V_0}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dV_0}{dr} - i\sqrt{2} \cdot \beta V_0 = 0 \quad (8)$$

che per  $r = a$  soddisfa la condizione al contorno:

$$\lambda \frac{dV_0}{dr} = h(V_0 - \theta_a) \quad (9)$$

nella quale  $h$  è data da:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_c} \frac{a}{a_i} + \frac{a}{\lambda_i} \ln \frac{a}{a_i} \quad (10)$$

si ottiene che l'espressione di  $V_0$  assume la seguente forma:

$$V_0 = \theta_a \frac{h' K_0(\zeta)}{h' K_0(\zeta_a) - K_0'(\zeta_a)} \quad (11)$$

dove:

$$h' = \frac{h}{\lambda \sqrt{2} \beta e^{\frac{i\pi}{4}}} 3$$

$$\zeta = r e^{\frac{i\pi}{4}} \sqrt{2} \beta$$

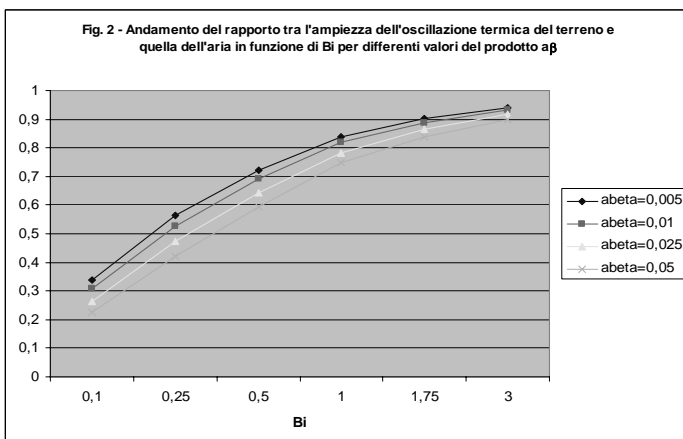
$$\zeta_a = a e^{\frac{i\pi}{4}} \sqrt{2} \beta$$

$K_0$  è la funzione di Bessel modificata che si annulla per grandi valori di  $\zeta$ .

Per l'oscillazione annuale  $\beta$  è dell'ordine di  $0,3 \text{ m}^{-1}$  e  $a$  nella maggior parte delle applicazioni è non superiore a  $0,15 \text{ m}$ , quindi il modulo di  $\zeta_a$  è di solito molto minore di  $1$ . Quindi per valutare  $V_0/\theta_a$  sulla superficie esterna del condotto si possono usare le espressioni di  $K_0$  e  $K_0'$  valide per piccoli valori di  $\zeta$  [15].

Dalla (11) si osserva che il rapporto  $V_0(a)/\theta$  dipende da due gruppi adimensionali  $\beta a$  e  $ha/\lambda = Bi$ .

Nella fig. 2 sono riportati gli andamenti di  $V_0(a)/\theta$  per quattro valori di  $\beta a$  al variare di  $Bi$ .



Confrontando le fig. 1 e 2 appare abbastanza chiaro che l'influenza della temperatura dell'aria sul campo termico del terreno è nettamente minore nel caso cilindrico rispetto a quello piano. In altri termini si può osservare che per i valori di  $h$  e  $a$  comunemente impiegati nelle applicazioni (determinati anche da considerazioni di natura tecnica ed energetica, relative ai valori minimi delle portate d'aria da trattare, ai diametri delle tubazioni ed all'energia per il funzionamento dei ventilatori) il terreno tende ad assumere i valori della temperatura medi stagionali dell'aria, in modo assai sensibile nel caso piano, con un maggiore smorzamento in quello cilindrico.

Nel ricavare le equazioni precedenti si è supposto che il terreno scambia calore con un fluido la cui temperatura varia solo nel tempo, ma in realtà nello scorrere nel condotto la temperatura del fluido tende ad avvicinarsi a quella del terreno. Se la temperatura del terreno ha un valore costante  $T_{s0}$  si ha che la temperatura del fluido  $T_f$  ad una distanza  $l$  dall'imboccatura del condotto è data da:

$$T_f = T_{s0} + (T_{fi} - T_{s0}) e^{-\frac{hPl}{Gc_f}} \quad (12)$$

Se la conducibilità termica del terreno è sufficientemente elevata è possibile supporre che esso si porti ad una temperatura che è determinata sostanzialmente dal valore medio della temperatura del fluido, che è data da:

$$T_{fm} = T_{s0} + \frac{Gc_f}{hPl} \left( 1 - e^{-\frac{hPl}{Gc_f}} \right) (T_{fi} - T_{s0}) \quad (13)$$

Pertanto come condizione al contorno nel calcolo del campo termico del terreno si userà la:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_{s0} - T_{fm}) = \frac{Gc_f}{Pl} \left( 1 - e^{-\frac{hPl}{Gc_f}} \right) (T_{fi} - T_{s0}) \quad (14)$$

Quindi per il calcolo della temperatura nel terreno si possono usare la (3) e la (11), vale a dire le espressioni ricavate quando la  $T_f$  è nota e risulta uguale a  $T_{fi}$  ponendovi al posto di  $h$  un  $h_m$  dato da:

$$h_m = \frac{Gc_f}{Pl} \left( 1 - e^{-\frac{hPl}{Gc_f}} \right) \quad (15)$$

Considerando che  $h_m$  è sempre minore di  $h$  si può dedurre che tenendo conto degli scambi termici in direzione assiale risulta ridotto l'effetto sulla temperatura del terreno dello scambio termico con il fluido.

#### 4. CONCLUSIONI.

In questo lavoro si intendeva mettere in evidenza le modalità di interazione termica tra il terreno e la superficie esterna del condotto per valutare in quale misura la superficie interna del condotto segue le oscillazioni termiche dell'aria introdotta o è in grado di smorzarle. Per condotti sufficientemente grandi ( $\Phi 200\div 300 \text{ mm}$ ) e per valori del

coefficiente di scambio termico  $h$  piuttosto elevati (dell'ordine di 15-20 W/m<sup>2</sup> °C) si ha che il terreno a contatto del condotto segue quasi completamente l'oscillazione termica annuale dell'aria. Per valori più comuni della velocità dell'aria nel condotto e quindi del coefficiente di scambio termico si osserva che l'oscillazione termica del terreno risulta smorzata del 30-50% rispetto a quella dell'aria.

L'ipotesi di riferimento per le valutazioni suddette è quella di un impianto che funzioni in modo continuo, in tale modalità operativa la temperatura del terreno è piuttosto fortemente influenzata da quella dell'aria. Si potrebbe pensare che in una modalità di funzionamento discontinuo (per esempio con interruzione nelle mezze stagioni) il terreno abbia la possibilità di bilanciare le quantità di energia scambiate con l'aria, incrementando l'efficienza del sistema grazie alla maggiore inerzia termica.

Parrebbe inoltre importante operare una valutazione più accurata della conduzione termica nel terreno in direzione parallela all'asse del condotto, che tende a ridurre l'influenza delle oscillazioni termiche del fluido su quelle del terreno.

## ELENCO SIMBOLI

$a$	raggio esterno del condotto (m)
$a_i$	raggio interno del condotto (m)
$Bi$	numero di Biot (adim.)
$c_f$	calore specifico a pressione costante del fluido (kJ/kg °C)
$G$	portata del fluido (kg/s)
$D$	diffusività termica del terreno (m <sup>2</sup> /s)
$h_c$	coefficiente di convezione dell'aria (W/m <sup>2</sup> °C)
$P$	perimetro del condotto (m)
$s$	spessore della parete del condotto (m)
$T_a$	temperatura dell'aria esterna (°C)
$T_{fi}$	temperatura del fluido all'imboccatura del condotto (°C)
$T_m$	temperatura media dell'aria esterna (°C)
$T_{trans}$	transiente termico (°C)
$\lambda$	coefficiente di conducibilità del suolo (W/m °C)
$\lambda_i$	coefficiente di conducibilità della parete del condotto (W/m °C)

## BIBLIOGRAFIA.

### Scambiatori terra-aria.

1. M. Cucumo, V. Ferraro, A. Vulcano, *Correlazioni semplificate per il dimensionamento di condotti interrati per il trattamento dell'aria primaria destinata al raffrescamento passivo degli edifici*, XXIII Congresso Nazionale UIT sulla Trasmissione del Calore, Parma, 20-22 giugno 2005.

2. M. Cucumo, S. Cucumo, V. Ferraro, A. Vulcano, *Un modello analitico monodimensionale per il dimensionamento degli scambiatori di calore interrati ad aria*, XXVI Congresso Nazionale UIT sulla Trasmissione del Calore, Napoli, 21-23 giugno 2006.
3. M. De Paepe, A. Janssens, *Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers*, Energy and Buildings, 35 (2003) 389-397.
4. K. H. Lee, R. K. Strand, *Implementation of an earth tube system into Energyplus program*, University of Illinois.
5. G. Mihalakakou, M. Santamouris, D. Asimakopoulos, *Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers*, Solar energy, 53 (1994) 301-305.
6. F. J. Neila González, *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*, Munilla-Leria, Madrid 2004.
7. J. Pfafferott, *Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency*, Energy and Buildings, 35 (2003) 971-983.
8. A. Tzaferis, D. Liparakis, M. Santamouris, A. Argiriou, *Analysis of accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air exchangers*, Energy and Buildings, 18 (1992) 35-43.

### Scambiatori terra-acqua.

9. M. De Carli, R. Del Bianco, F. Fellin, M. Manente, M. Tonon, R. Zecchin, *Sviluppi nelle pompe di calore: il terreno come sorgente termica*, Convegno AICARR Le moderne tecnologie negli impianti e nei componenti per il riscaldamento, Padova, 19 giugno 2003, 275-315.
10. S. P. Kavanaugh, K. Rafferty, *Ground Source Heat Pumps – Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*, A.S.H.R.A.E. Applications Handbook, 1997.
11. V. C. Mei, C. J. Emerson, *New Approach for Analysis of Ground Coil Design for Applied Heat Pump Systems*, ASHRAE Transactions, 91 (2): 1216-1224, 1985.
12. S. P. Rottmayer, W. A. Beckman, J. W. Mitchell, *Simulation of a Single Vertical U-tube Ground Heat Exchanger in an Infinite Medium*, ASHRAE Transactions, 103 (2): 651-659, 1997.
13. G. Starace, *Le pompe di calore geotermiche*, Convegno AICARR Le moderne tecnologie negli impianti e nei componenti per il riscaldamento, Padova, 19 giugno 2003, 317-335.
14. J. W. Thornton, T. P. McDowell, J. A. Shonder, P. J. Hughes, D. Phaud, G. Hellstrom, *Residential Vertical Geothermal Heat Pump System Models: Calibration to Data*, ASHRAE Transactions, 103 (2): 660-674, 1997.

### Scambi termici nel terreno.

15. H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2d ed., Clarendon Press, Oxford, 1959.

## VERSO LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE

Giorgio Raffellini<sup>1</sup>, Lorenzo Giannetti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professore ordinario ed energy manager dell'Università degli Studi di Firenze, giorgio.raffellini.taed.unifi.it<sup>2</sup>  
vincitore assegno di ricerca 2006/2007, giannetti.lorenzo@libero.it

### SOMMARIO

Si è condotta una ricerca su alcuni edifici dell'Università degli Studi di Firenze, rilevando le prestazioni e la composizione delle chiusure opache e finestrate di quest'ultimi, la funzionalità degli impianti, i consumi di energia elettrica e di energia primaria per il riscaldamento. Infine si è proceduto ad un calcolo dei fabbisogni di energia primaria per la produzione di acqua calda e riscaldamento.

Successivamente gli edifici sono stati classificati secondo il loro consumo e sono stati previsti una serie di interventi volti al miglioramento delle loro prestazioni energetiche.

Ogni intervento applicato ad un edificio è stato valutato secondo un'analisi costi benefici condotta con il calcolo del miglioramento previsto per l'indice di prestazione energetica, il risparmio annuo, il costo di iniziale; il Valore Attuale Netto (VAN); il Tempo di Ritorno dell'Investimento (TRI); i benefici ambientali evitati (emissioni di CO<sub>2</sub>).

Nel panorama complessivo si è visto che la maggior parte degli edifici precedenti gli anni '80, presentano fabbisogni per il riscaldamento molto elevati, mentre quelli realizzati negli ultimi 20 anni hanno prestazioni energetiche più contenute e in alcuni casi, molto vicini agli standard europei e italiani previsti per il 1° gennaio 2006 dal decreto n°192 del 2005.

### PREMESSA

A seguito del complicarsi delle relazioni politiche internazionali e dell'aumento ciclico del prezzo del petrolio, verificatosi nell'ultimo biennio, già nel 2005 si è ritenuto necessario pensare al tema della certificazione energetica, al fine di diminuire i consumi di petrolio, gas e altri combustibili usati.

Così agli inizi del 2006, anche a seguito dei risultati incoraggianti scaturiti da alcune tesi di laurea e degli alti costi di riscaldamento che l'Ateneo fiorentino dovrà sopportare, si è ritenuto necessario improntare una attività di ricerca basata sulla normativa esistente, anche se non ancora disponibile ai fini della certificazione energetica degli edifici dell'Università degli Studi di Firenze.

Innanzitutto si è cercato di fare un quadro unitario sulla normativa nazionale in questione partendo dall'articolo 30 della Legge del 1991 n°10 e soprattutto del Decreto Ministeriale del 2005 n°192 e da varie norme UNI del settore.

In questo quadro l'Italia si presentava già abbastanza preparata ai fini della certificazione energetica degli edifici per quanto concerneva il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria, mentre erano e sono ancora carenti le valutazioni per i fabbisogni energetici destinati al condizionamento e all'illuminazione.

Una sentita mancanza era pure un modello di certificato che potesse raccogliere i dati e servire da modello unificato, così vagliando le varie proposte presenti, è stato elaborato un modello, che potesse assolvere a questa funzione in modo ottimale.

Per eseguire i calcoli non si è ricorso a nessun programma in commercio, preferendo affidare il compito a fogli elettronici elaborati sulla base delle norme tecniche.

### IL CALCOLO

Alla base del calcolo del fabbisogno di energia primaria c'è una raccolta dei dati relativa al singolo edificio analizzato, tramite relazioni di progetto, elaborati grafici, fotografie e ipotesi basate, in mancanza di documentazione esplicita, sulle visite in loco, sulla Raccomandazione 03/3 del CTI in funzione delle tecnologie costruttive locali. In questo modo è stata ipotizzata la possibile composizione dei vari componenti opachi di ogni edificio ed in base allo spessore è stata ricavata la relativa trasmittanza ed altri dati connessi non rilevabili direttamente.

Il calcolo del fabbisogno è stato fatto in base alla norma UNI EN 832 e la UNI EN 13790, usando il metodo mensile e considerando i dati relativi al clima, all'ubicazione dell'edificio e alle sue caratteristiche tecnologiche, come la trasmittanza di tutti gli elementi trasparenti ed opachi, le caratteristiche dell'impianto, le varie superfici degli elementi.

Successivamente si è intervenuti con la norma UNI EN 10348 e sono stati calcolati i vari rendimenti d'impianto (rendimento di regolazione, emissione, distribuzione, produzione e rendimento globale stagionale) e l'energia primaria necessaria, che poi è stata divisa per la superficie utile netta riscaldata, in modo da ottenere l'energia primaria (EP) dell'edificio singolo.

Per il calcolo dei vari livelli limite si è fatto esplicito riferimento al Decreto n°192 del 2005 e quindi si sono ottenuti i parametri richiesti in funzione della zona termica, dei gradi giorno e del rapporto superficie disperdente volume lordo riscaldato (S/V).

Successivamente si sono valutate le varie ipotesi per interventi mirati alla riqualificazione energetica per ogni edificio e i materiali da usare per tali interventi sono stati scelti da una lista di circa venti voci in base al prezzo, alla modalità

di posa in opera, alla loro composizione e all'impatto complessivo sull'edificio esistente.

Infine è stato compilato il modello di certificato proposto per ogni edificio con le informazioni divise secondo varie categorie:

1. raccolta dei dati relativi ai componenti tecnologici del sistema edificio impianto:

- dati relativi al certificato;
- dati relativi al proprietario e all'edificio;
- dati relativi all'impianto;
- caratteristiche del sistema edificio impianto;
- dati riguardanti l'utilizzo di fonti rinnovabili di energia;

2. analisi dei consumi e stima dei fabbisogni:

➤ analisi dei consumi del sistema di riscaldamento e di illuminazione;

➤ fabbisogni di energia termica e primaria per la produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento;

➤ indici energetici in rapporto alla superficie relativi ai vari fabbisogni;

➤ valutazione delle prestazioni del sistema edificio impianto;

3. interventi proposti, stima dei costi e dei benefici:

➤ descrizione e classificazione degli interventi proposti per ridurre i costi di gestione e migliorare le prestazioni energetiche del sistema edificio impianto;

4. spiegazioni e funzione civica degli aspetti della certificazione.

## GLI EDIFICI CERTIFICATI

Il parco edifici dell'Università degli studi di Firenze è molto vasto e negli ultimi anni è stato intrapreso un processo di rinnovamento e decentramento dal centro storico della città, con la costruzione del Polo Umanistico di Novoli e del Polo Scientifico di Sesto Fiorentino, anche se l'Ateneo ha interesse a mantenere la sua forte presenza nel centro cittadino, soprattutto per le facoltà che non hanno bisogno di laboratori e per le unità amministrative.

Gli unici edifici esclusi dalla ricerca sono quelli in affitto e quelli in fase di dismissione e di vendita.

Si sono così suddivisi gli edifici a seconda della tecnica costruttiva utilizzata e delle prestazioni energetiche che forniscono.

1. Edifici recenti (1995-2005): il polo di Sesto fiorentino è caratterizzato da 13 edifici, riscaldati da una centrale termica centralizzata composta da due generatori ad acqua surriscaldata dalla potenzialità 9302 kW ciascuno, con un rendimento globale stimato dell'89% superiore al valore limite dell'88%. Ogni edificio è collegato alla rete principale, tramite un apposito circuito e ad uno scambiatore di calore di adeguata potenzialità.

Per tutti gli edifici il livello di fabbisogno è al disotto di quello limite, anche se ci sono tre edifici, che registrando un utilizzo con un numero di ore almeno triplo rispetto a gli altri hanno manifestato fabbisogni molto alti.

Questa situazione porta il livello complessivo del complesso a 106.5 kWh/m<sup>2</sup>anno, contro un livello di fabbisogno limite di 66.1 kWh/m<sup>2</sup>anno. Questo è dovuto alla presenza al loro interno di apparecchiature termosensibili, che risentono delle variazioni di temperatura anche di qualche grado.

Se si escludono i tre edifici in questione il livello di fabbisogno medio annuo per unità di superficie sarebbe di 61,8 kWh/m<sup>2</sup>anno, quindi soddisfacenti la norma.

La struttura dell'edificio è di solito una struttura in cemento armato isolata con circa 5 cm di isolante di buona qualità sia sulle partizioni verticali opache che su tutti i solai disperdenti e trasmittanza termica attorno a 0.50 W/m<sup>2</sup> K, finestre con vetri camera 5-12-5 con valori di trasmittanza attorno a 2.80 W/m<sup>2</sup> K, coperture piane, con strato di isolante attorno ai 5 cm e trasmittanza di 0.6 W/m<sup>2</sup>K

Anche gli edifici del polo di Novoli presentano circa le stesse caratteristiche costruttive e impiantistiche, quindi analoghi valori di prestazione termica.

Però l'impianto è composto da 3 generatori con bruciatore atmosferico con potenzialità 650 kW ciascuno e pompe di calore, il rendimento globale stagionale è stimato pari all'88% contro un valore limite di 85%.

Il livello di fabbisogno medio si attesta attorno a 50.51 kWh/m<sup>2</sup>anno a fronte di un livello limite di 53.5 kWh/m<sup>2</sup>anno, quindi soddisfatto.

Sia nel caso di Sesto Fiorentino, di Novoli e di Viale Morgagni 40, che ha circa le stesse prestazioni termiche degli altri due precedentemente descritti, l'impianto di riscaldamento è centralizzato, gli edifici sono dotati di impianti di ventilazione meccanica e di condizionamento.

2. Edifici di costruzione attorno al 1970-1990: in questa categoria rientrano alcuni edifici come il padiglione prefabbricato e l'ex Lens di Arcetri. Questi edifici anche se di proprietà dell'ateneo fiorentino sono attualmente vuoti. Essi presentano un discreto livello di isolamento delle pareti con valori di trasmittanza compresi tra 0.58 e 1.11 W/m<sup>2</sup>K e delle coperture prefabbricate e isolate (tra 0.61 e 0.77 W/m<sup>2</sup>K), infissi con trasmittanza da 2.9 a 3.6 W/m<sup>2</sup>K, impianti di riscaldamento in buone condizioni e impianti di condizionamento semi nuovi, in quanto dovevano mantenere all'interno sempre una temperatura costante a causa della presenza di macchinari termosensibili. Per questo motivo il loro consumo si aggira attorno ai 159.8 kWh/m<sup>2</sup>anno.

Altri edifici un po' più datati ma con buone prestazioni energetiche sono quelli di Chimica agraria di via Maragliano (Umuri=0.52 W/m<sup>2</sup>K; Ucopertura=0.89 W/m<sup>2</sup>K Uinfissi=3.10 W/m<sup>2</sup>K e EP=78.2 kWh/m<sup>2</sup>K), la facoltà di statistica in viale Morgagni (Umuri=1.15 W/m<sup>2</sup>K; Ucopertura=0.72 W/m<sup>2</sup>K Uinfissi=4.63 W/m<sup>2</sup>K EP=89.5 kWh/m<sup>2</sup>K) e industrie agrarie (Umuri=1.15 W/m<sup>2</sup>K; Ucopertura=1.24 W/m<sup>2</sup>K Uinfissi=4.90 W/m<sup>2</sup>K EP=80.4 kWh/m<sup>2</sup>K); questi registrano un consumo medio attorno a gli 82.7 kWh/m<sup>2</sup>anno.

3. Edifici storici: sono la maggioranza e vi si trovano grandi complessi di valore storico artistico notevole come Lettere, Architettura Santa Verdiana e Santa Teresa, Dipartimento di Tecnologie dell'Architettura e Design "Pier Luigi Spadolini", ecc.

In questi edifici le murature sono portanti composte da laterizi, o laterizi e pietrame presentano spessori notevoli fino a 1,05 m con trasmittanze da 0.77 fino a 2.4 W/m<sup>2</sup>K, coperture a falde in legno dal valore di 1.31 W/m<sup>2</sup>K. Gli infissi sono generalmente in legno con vetri singoli e valori delle trasmittanze alti tra i 4.0 e i 5.2 W/m<sup>2</sup>K. Gli impianti di riscaldamento sono autonomi e in condizioni di buona efficienza, inoltre spesso vi si trovano anche impianti di condizionamento split.

Il loro consumo è alto si aggira attorno ai 120 kWh/m<sup>2</sup>anno.

## La produzione di acqua calda sanitaria e il condizionamento estivo

In tutti questi edifici la produzione di acqua calda per usi igienico sanitari e per usi di ricerca è quasi interamente

affidata a scaldabagni elettrici presenti nelle varie sedi, in condizioni generalmente buone, anche se obsoleti, ciascuno con una capacità variante dai 50 ai 80 litri di accumulo e potenza di 60 kW.

I fabbisogni annui per unità di superficie per la produzione di acqua calda per usi igienico sanitari si attestano attorno ad una media di 10.2 kW/m<sup>2</sup>anno; tutti gli edifici risultano avere valori molto vicini tra 8.5 e 12.5 kW/m<sup>2</sup>anno perché sono adibiti alla stessa funzione e l'acqua calda è utilizzata solo per lavarsi le mani e nei laboratori per usi didattici. Solo i locali del Cus nel Polo di Sesto fiorentino presentano valori attorno a 14.6, perché il fabbisogno di acqua calda sanitaria è ivi maggiore.

Un'altra questione rilevante è quella del raffrescamento estivo, difatti gli edifici di recente costruzione o in quelli che hanno subito degli interventi di riqualificazione sono dotati di centrali di trattamento aria che assolvono anche ai compiti di raffrescamento estivo, mentre negli altri si possono trovare split e refrigeratori mobili estremamente "energivori", usati oltremodo appena la temperatura esterna si alza di qualche grado.

### I miglioramenti

Per ogni edificio è stata scelta una lista standard di interventi:

- sostituzione degli infissi;
- isolamento a cappotto;
- isolamento della copertura;
- isolamento dei cassonetti degli avvolgibili se presenti;
- sostituzione della caldaia.

Negli edifici presi in esame ad esclusione di quelli più recenti: viale Morgagni; il polo umanistico di Novoli e quello scientifico di Sesto fiorentino; presentano caratteristiche in grado di rendere economicamente convenienti gran parte degli interventi proposti.

Quelli in grado di fornire risultati apprezzabili, con costi iniziali relativamente contenuti, sono la sostituzione della caldaia con un TRI pari a 3.1 anni e l'isolamento della copertura TRI 7.26 anni.

Gli altri interventi come la sostituzione degli infissi e l'isolamento a cappotto, con TRI rispettivamente pari a 18.26 anni e 12.54 anni, presentano costi di investimento iniziali troppo alti e molte volte non proponibili soprattutto per gli edifici storici, perché risultano vincolati dalla Soprintendenza ai Beni Architettonici e Ambientali.

### CONCLUSIONI

Nell'analisi condotta i consumi e i fabbisogni annui per unità di superficie hanno valori simili con una media di circa 98 kWh/m<sup>2</sup>anno, tanto da ricadere in classe D della scala di consumi che va da 90 a 110 kWh/m<sup>2</sup>anno.

All'interno di tutto il parco edifici dell'ateneo fiorentino si possono trovare valori molto alti soprattutto attribuibili a gli edifici dell'ex Lens, ex padiglione prefabbricato di Arcetri; Lens, Fisica nucleare e Fisica di Novoli, perché avevano un numero di ore triplo rispetto a quello di un edificio normale, in quanto contengono apparecchiature termosensibili e quindi che richiedono una temperatura costante al suo interno sia in estate che in inverno. Altri edifici con valori di consumo molto alti (superiori ai 110 kWh/m<sup>2</sup>anno) sono Lettere, villino Abetti

ed il Garbasso ad Arcetri, il complesso di Santa Teresa; palazzo Vegni, Zootecnia e Agraria alle Cascine.

Gli edifici meno "energivori" risultano quelli di nuova costruzione dei Poli di Novoli e Sesto fiorentino e di viale Morgagni 40, quindi la media risulta notevolmente più bassa di quella senza la loro presenza.

Gli impianti di riscaldamento degli edifici dell'Università di Firenze sono di due tipologie: biodisel e metano. Le centrali impianti sono revisionate periodicamente e presentano valori di rendimento accettabili per la Legge n°10 del 1991, ma ora non per il recente decreto n°192 del 2005.

Così la verifica risulta soddisfatta per gli impianti dei poli di Novoli (ng= 89% nglim= 88%) e Sesto fiorentino (ng= 88% nglim= 85%), e Santa Verdiana (ng= 75% nglim= 75%), perché oggetto di recente ristrutturazione, ma non per gli altri edifici che presentano valori di rendimento tra 64% e 71%, contro i valori limite tra 72% e 76%.

Per quanto concerne al produzione di acqua calda sanitaria al momento risulta impossibile effettuare un censimento perché sono dislocati in quasi tutti i bagni e nei vari laboratori che ne necessitano, inoltre non esistono documentazioni attestanti la loro esatta ubicazione e quantità, perché i vari dipartimenti sono soliti installare tali apparecchi con fondi propri. In questo modo viene bypassata l'attività di controllo dei consumi svolta dall'energy manager e dagli uffici tecnici dell'Università.

Il loro consumo elettrico, secondo le valutazioni effettuate, è rilevante, perché risultano accesi 24 ore su 24 per tutto l'anno e non pare possibile scorporarlo dai consumi elettrici totali dell'intero edificio.

Per quanto riguarda il condizionamento estivo la situazione richiederebbe un censimento degli impianti e della loro reale situazione, anche a fronte di una migliore organizzazione delle risorse dell'Ateneo, in quanto esistono edifici sfitti e chiusi da anni, nei quali si trovano impianti split, che potrebbero essere adattati ad altri, riducendo così i costi di acquisto di nuove macchine frigorifere.

Gli interventi di riqualificazione risultano convenienti ed attuabili in larga parte per gli edifici di costruzione compresa tra il 1970 e il 1990, perché non hanno un alto livello tecnologico e neanche un valore storico, quindi non si presentano particolari vincoli. Inoltre in molti casi sono dotati di un sottotetto facilmente coibentabile, così con un costo relativamente basso si può realizzare un intervento economicamente conveniente.

### BIBLIOGRAFIA

1. Cellai G., Casadio M., Progettare con la legge 10/91, Carocci Editore, Roma 1998.
2. AICARR, La certificazione energetica degli edifici: l'Italia si prepara?, opuscolo relativo alle tavole rotonde di Padova 17 giugno 2004, Media progress, Monza 2004.
3. AICARR, La certificazione e l'efficienza energetica del sistema edificio impianto, aspetti tecnici interpretativi e procedurali, tavola rotonda di Firenze del 15 settembre 2006, Milano 2006.

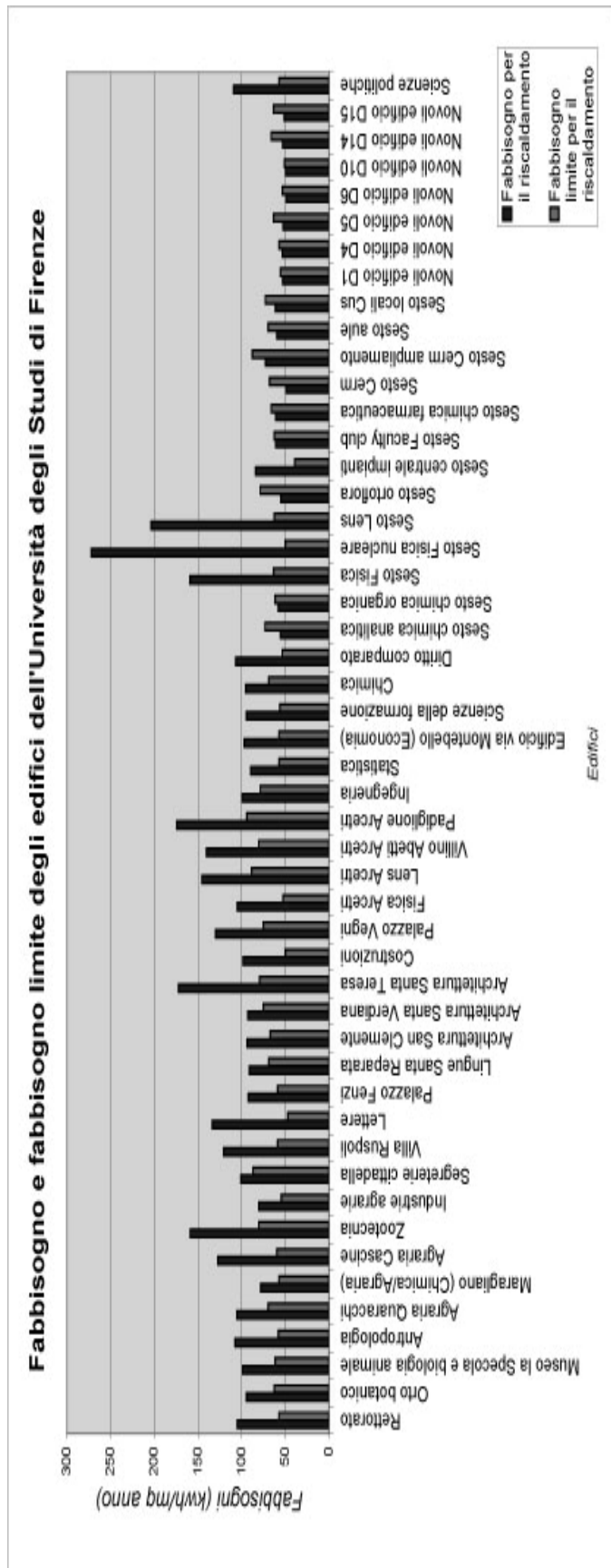


Figura 1: confronto tra fabbisogno e fabbisogno limite per il riscaldamento

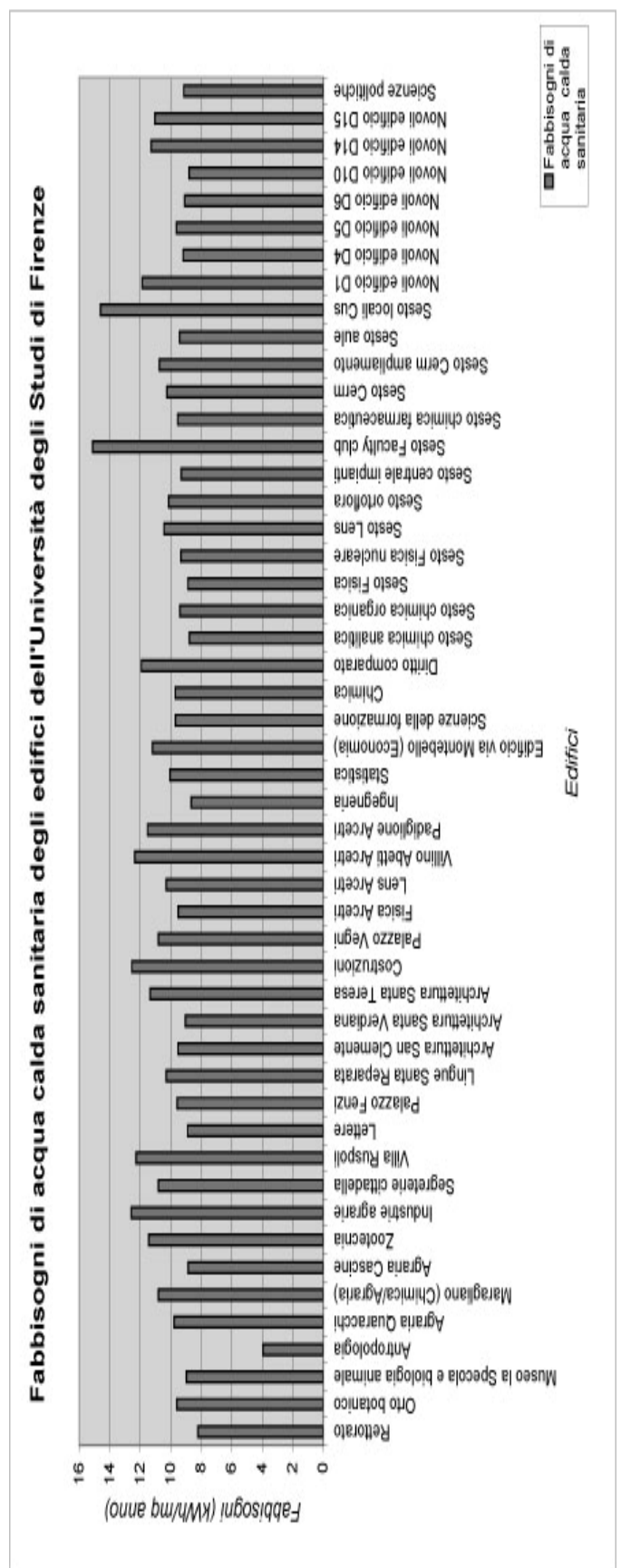


Figura 2: fabbisogni di acqua calda sanitaria

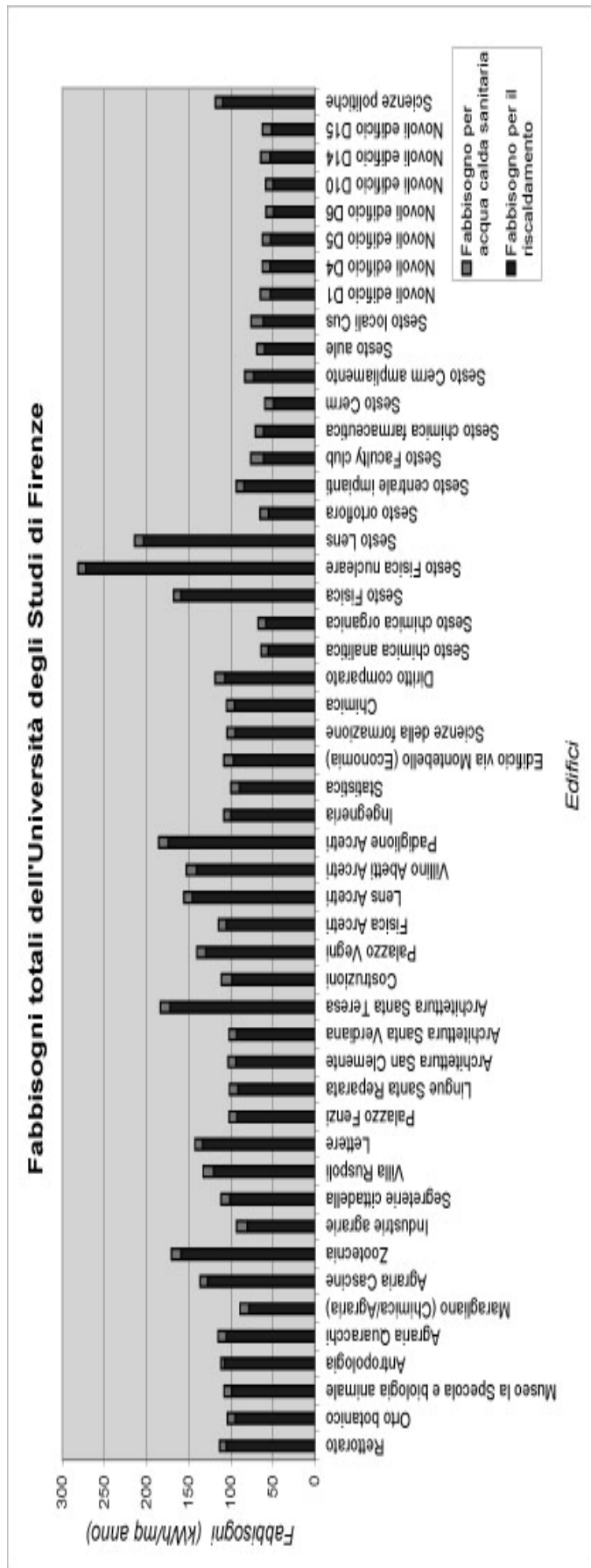


Figura 3: fabbisogni totali

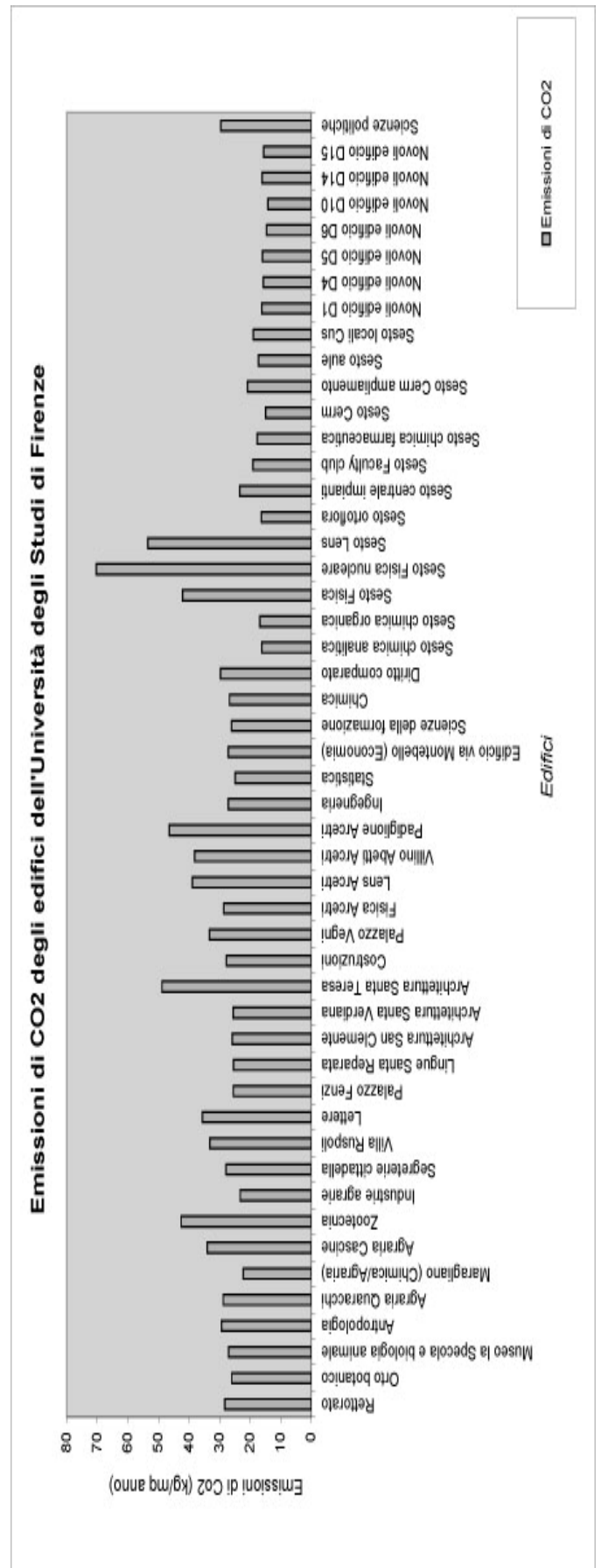


Figura 4: emissioni di CO2 annue



## STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICO DI UN IMPIANTO DI CONDIZIONAMENTO A POMPA DI CALORE GEOTERMICA E CONFRONTO CON MODELLO DI CALCOLO ATTRAVERSO IL SOFTWARE DI SIMULAZIONE TRNSYS

U. Desideri<sup>1</sup>, L. Arcioni<sup>1</sup>, D. Leonardi<sup>1</sup>, F. Zepparelli<sup>1</sup>, N. Sorbi<sup>1</sup>, S. Cocchi

<sup>1</sup>Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Via G. Duranti 93 - 06125 Perugia Tel. +39 0755853740, Fax +39 0755853736

### SOMMARIO

La necessità di fronteggiare i cambiamenti climatici dovuti essenzialmente alle emissioni di gas serra derivanti da attività sia industriali che civili, conferisce grande importanza alla ricerca finalizzata alla sperimentazione di nuove tecnologie per la riduzione di tali emissioni, che prevedano lo sfruttamento delle energie rinnovabili. Tra queste, l'energia geotermica risulta essere un'interessante alternativa relativamente alla produzione di energia per la climatizzazione degli edifici sia per quanto riguarda il riscaldamento che il raffrescamento, attraverso l'utilizzo di pompe di calore geotermiche.

Infatti, sfruttando le minori oscillazioni di temperatura del sottosuolo rispetto alla temperatura dell'aria, le pompe di calore geotermiche, consentono in inverno di prelevare calore dal terreno e utilizzarlo per il riscaldamento dell'edificio, in estate, di prelevare calore dall'interno dell'edificio e di cederlo al terreno. Tali dispositivi possono inoltre essere utilizzati per il riscaldamento di acqua per uso sanitario.

Nel presente lavoro, è stata effettuata un'analisi di pre-fattibilità dell'applicazione di un sistema che sfrutti le pompe di calore geotermiche, utilizzate con pavimento radiante, ad una palazzina di un complesso edilizio di Ponte Pattoli (PG), già progettato con particolari accorgimenti finalizzati alla riduzione dei consumi energetici ed alla salvaguardia ambientale.

Per il dimensionamento del sistema è stato utilizzato il software RETScreen International GSH3.

Infine, è stato effettuato un confronto, relativamente ai consumi di energia ed alle emissioni di gas serra, con l'attuale sistema di riscaldamento in uso nel complesso.

### LE POMPE DI CALORE

Le pompe di calore rappresentano una risposta al miglioramento del rendimento della produzione di calore a bassa temperatura. Infatti, la vaporizzazione o la condensazione dei fluidi avviene a temperature diverse a seconda della pressione a cui ha luogo il processo: a pressioni più elevate, il cambiamento di fase si svolge a temperature più alte, e viceversa. Un aumento di pressione in un vapore implica l'aumento del livello termico della sua condensazione e costituisce quindi uno strumento concreto di estrema efficacia per elevare la temperatura di un processo di cessione di calore. In particolare, è quindi possibile far vaporizzare un fluido a bassa pressione, e dunque a bassa temperatura, sottraendo il calore necessario al processo all'ambiente, elevare il livello di temperatura a cui tale energia termica è disponibile comprimendo il vapore, con una spesa di lavoro meccanico, e cedere infine all'utilizzatore il calore latente facendo condensare il vapore.

### LE POMPE DI CALORE GEOTERMICHE

La pompa di calore geotermica è una macchina capace di trasferire calore da un ambiente freddo, il sottosuolo o l'acqua di falda (dal quale il calore viene prelevato a bassa temperatura), ad un ambiente caldo, l'abitazione da riscaldare, verso la quale il calore è ceduto a temperatura molto più alta.

Tale macchina ha un duplice utilizzo, può essere usata per riscaldare d'inverno e, invertendo il ciclo, per rinfrescare d'estate; inoltre, fornisce acqua calda sanitaria.

La temperatura del sottosuolo subisce delle variazioni dovute alle oscillazioni della temperatura dell'aria (figura 1).

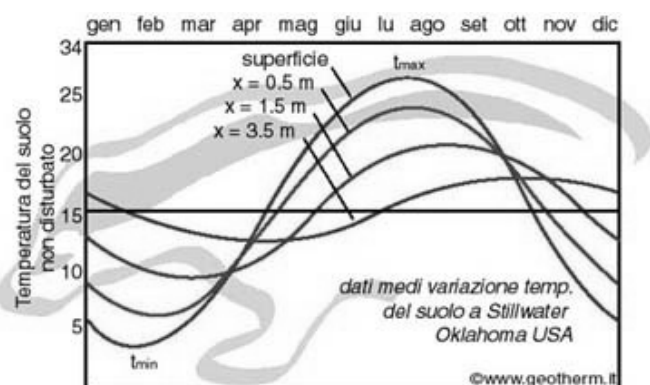


Figura 1. Andamento delle temperature con la profondità e temperatura dell'aria.

Tuttavia tali oscillazioni di temperatura del terreno diminuiscono all'aumentare della profondità. In particolare la temperatura del terreno a 20 metri di profondità risulta essere pari a circa 14°C e costante. La pompa di calore consente dunque di sfruttare il calore a bassa temperatura contenuto nel terreno per ridurre i consumi di energia per usi termici, quali il riscaldamento, la climatizzazione e la produzione di acqua calda. In inverno assorbe calore dalla terra e lo trasferisce all'abitazione o all'acqua da scaldare, viceversa in estate assorbe calore dall'abitazione e lo trasferisce al terreno. Questo processo si realizza fornendo energia elettrica alla macchina che "pompa calore" e risulta essere conveniente dal punto di vista energetico in quanto con 1 kWh di energia elettrica si producono fino a 5 kWh di energia termica.

Il rendimento di una pompa di calore è inversamente proporzionale alla differenza di temperatura tra la sorgente di

energia e l'ambiente da riscaldare; in pratica, più grande è la differenza fra le due temperature, meno efficiente è il sistema. Si può dunque facilmente capire come il rendimento di una pompa di calore geotermica sia certamente maggiore rispetto a quello di un sistema tradizionale che prelevi calore dall'aria esterna. Una peculiarità delle pompe di calore geotermiche è che sono adatte per sistemi di distribuzione del calore di tipo radiante a bassa temperatura come ad esempio pavimenti e pareti radianti, ventilconvettori, che richiedono di essere installati in edifici dotati di buon isolamento termico. Infatti, le pompe di calore operano con temperatura massime di 40-50°C.

Per la costruzione dell'impianto nel suolo, utilizzato come serbatoio di calore, vengono, in genere, praticate una o più perforazioni del diametro di 10-35 cm, fino a una profondità che dipende dal volume dell'edificio da servire. All'interno dei fori vengono fatte passare delle condutture in cui circola il fluido termovettore.

Una volta realizzato il foro, vengono posizionati i tubi della sonda e poi si procede al riempimento della perforazione con un getto indurente che inglobi i tubi. E' importante che tale operazione venga eseguita accuratamente in quanto presenta la duplice funzionalità di assicurare un buon contatto termico tubi-terreno e di impedire fenomeni di inquinamento delle falde acquifere sotterranee per percolazione di inquinanti dalla superficie o per contaminazione incrociata tra le falde attraversate alle diverse profondità. I materiali in genere utilizzati per il riempimento sono costituiti da bentonite o miscele bentonite-cemento o bentonite-calcestruzzo. Il parametro critico di scelta del materiale di riempimento è la sua conducibilità termica, in quanto incide sull'efficienza di scambio termico con il terreno, essendo proprio la zona circostante le tubazioni quella interessata dal massimo flusso di calore. Al fine di migliorare tale conducibilità si possono utilizzare anche additivi, quali la quarzite, la polvere di allumina o di ferro, il carburo di silicio.

Per un corretto dimensionamento dell'impianto è opportuno disporre di una serie di informazioni, tra cui anche il profilo stratigrafico della zona considerata, l'indagine dell'eventuale presenza d'acqua nel sottosuolo e la sua velocità, il rapporto tra calore ceduto e assorbito dal terreno, il surriscaldamento o il raffreddamento del terreno ed eventualmente il limite di gelo. Ancora, non tutti i tipi di sottosuolo sono adatti, occorre un tipo di sottosuolo con una conducibilità termica sufficientemente elevata, cioè una buona capacità di trasportare calore. Sono dunque necessarie indagini geologiche per determinare il rendimento termico del terreno.

Per installare una pompa di calore geotermica occorre poter effettuare lo scavo che alloggia la sonda geotermica (giardino o altro spazio), o prevederne l'installazione in fase di progettazione dell'edificio.

La presenza d'acqua aumenta il rendimento di un impianto migliorando lo scambio termico tra impianto e sottosuolo.

Esistono zone di protezione delle acque sotterranee e superficiali in cui la realizzazione di impianti geotermici è regolamentata e deve essere autorizzata dalle autorità competenti; è opportuno raccogliere informazioni presso il comune dove è prevista l'installazione.

## COMPONENTI DI UN SISTEMA CON POMPE DI CALORE GEOTERMICHE

Un sistema a pompa di calore geotermica è costituito da tre componenti fondamentali (figura 2):

1. Connessione a terra (insieme di tubi opportunamente interrati per scambiare calore con il sottosuolo):
  - Collegamento con il terreno (orizzontale o verticale);
  - Collegamento con falda idrica;
  - Collegamento con acqua superficiale.
2. Pompa di calore. Gli elementi principali di una pompa di calore sono il compressore, che consente di assorbire calore dall'esterno attraverso il cambiamento di stato del fluido circolante nella macchina, e il condensatore, che trasferisce il calore assorbito all'impianto di riscaldamento. L'ASHRAE ha individuato una nomenclatura standard per le pompe di calore che sfruttano i sistemi di prelievo geotermico elencati al punto 1:
  - Pompe di calore ad acqua superficiale (Surface Water Heat Pumps – SWHP);
  - Pompe di calore ad acqua di falda (Ground Water Heat Pumps – GWHP);
  - Pompe di calore accoppiate al terreno (Ground-Coupled Heat Pumps – GCHP).
3. Impianto interno di distribuzione calore e freddo (scambio di calore a bassa temperatura con i locali dell'abitazione).

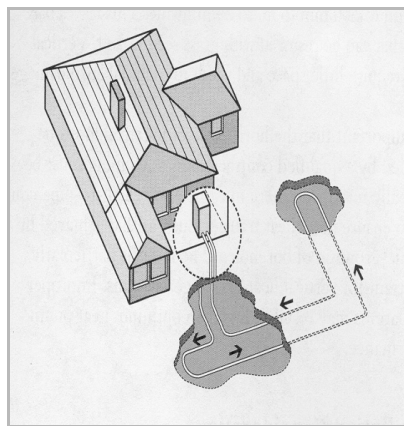


Figura 2. Componenti di un sistema con pompe di calore geotermiche.

### Connessione a terra

La scelta della tipologia di connessione più opportuna dipende dal clima, dalle caratteristiche del suolo e dalla disponibilità di spazio per la realizzazione della connessione stessa.

La tipologia di connessione maggiormente utilizzata è quella che sfrutta le pompe di calore accoppiate al terreno; questo perché i sistemi ad acqua di falda e ad acqua superficiale, richiedono particolari situazioni ambientali legate alla disponibilità idrica e soprattutto comportano maggiori vincoli legislativi dovuti al possibile inquinamento delle acque.

Le connessioni *verticali* costituiscono un sistema chiuso, e sono spesso utilizzate negli edifici commerciali e nelle scuole laddove non esiste sufficiente disponibilità di terreno per i collegamenti orizzontali.

Nelle connessioni verticali i fori sono realizzati su una superficie larga circa 6 m e vanno in profondità per 30-350 m a seconda dell'utenza da servire, ma solitamente il range è di 50-150 m. Nei fori vengono inserite due tubazioni collegate ad

U. I collegamenti verticali sono poi uniti alle tubazioni orizzontali nello scavo e collegati alla pompa di calore nell'edificio.

I vantaggi di questo tipo di sistema sono dovuti al fatto che per l'installazione richiedono una piccola superficie di terreno, si adattano ad ogni tipologia di terreno (anche roccioso) ed hanno un'alta efficienza di captazione. Tuttavia il sistema è abbastanza costoso in quanto sono elevati i costi di perforazione.

Il sistema a connessione *orizzontale* è generalmente economicamente conveniente per le installazioni residenziali, in particolare per le nuove costruzioni dove si ha a disposizione un terreno sufficientemente esteso. Tale sistema necessita di fosse profonde almeno 1,4 m. In genere, si utilizzano due tubi, uno posto a 1,9 m e uno a 1,4 m di profondità oppure posti fianco a fianco a 1,6 m.

Il vantaggio di tale sistema consiste nel fatto che presenta dei costi di installazione contenuti. Tuttavia tale sistema si adatta bene solo a piccoli edifici, è necessaria un'ampia superficie di terreno, e la temperatura del terreno subisce variazioni maggiori data la piccola profondità degli scavi.

Le connessioni con *acqua di falda* sono sistemi a pozzi di captazione e reimmissione e sfruttano l'acqua di falda come sorgente di energia termica e come fluido termovettore. Si utilizza se le acque, estratte dai pozzi, sono adatte all'utilizzo diretto nell'impianto con pompa di calore. Dopo lo scambio termico con la pompa l'acqua può essere scaricata in acque superficiali (impianto a singolo pozzo) oppure reimpressa nella falda per mezzo di un altro pozzo (impianto a doppio pozzo).

Se il sito dispone di un'elevata quantità d'acqua, si può sfruttare questa caratteristica per ridurre i costi ed utilizzare dunque il tipo di connessione ad *acqua superficiale*.

Un gruppo di tubi corre sottoterra dall'edificio alla sorgente d'acqua e si avvolge a spirale ad una profondità minima di 2,5 m per evitare il congelamento. L'acqua superficiale utilizzata deve avere certe caratteristiche relativamente al volume, la profondità e i criteri qualitativi.

## APPLICAZIONE AD UNA PALAZZINA DEL COMPLESSO EDILIZIO DI PONTE PATTOLI

E' stato effettuato uno studio di pre-fattibilità relativo all'installazione di un sistema con pompe di calore geotermiche, utilizzate con pavimento radiante, in un complesso immobiliare in località Ponte Pattoli in provincia di Perugia [3].

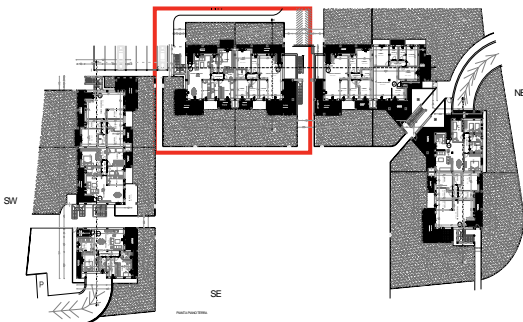


Figura 3. Palazzina C del complesso edilizio di Ponte Pattoli.

Il complesso è stato progettato con particolari accorgimenti finalizzati ad ottenere bassi consumi energetici ed un'elevata

salvaguardia dell'ambiente.

Il complesso edilizio di Ponte Pattoli è costituito da 25 appartamenti dislocati su 5 palazzine costituite da 5 unità immobiliari ciascuna.

Lo "scenario base" per il riscaldamento e raffrescamento previsto nel complesso è costituito da un sistema di riscaldamento a pavimento radiante alimentato da una caldaia a condensazione (1 caldaia per appartamento), e da un sistema di raffrescamento costituito da condizionatori split (3 unità per appartamento).

Il dimensionamento dell'impianto di riscaldamento-raffrescamento relativamente alla sola palazzina C del complesso (figura 3) è stato effettuato con l'ausilio del software RETscreen International GSHP3.

Nell'utilizzo del software sono state considerate le seguenti caratteristiche per lo "scenario base" ed il "sistema a pompe di calore geotermiche".

*Scenario base:*

- Efficienza della caldaia a condensazione pari all'85%;
- Combustibile utilizzato: gas metano;
- COP sistema di raffrescamento pari a 3.

*Sistema a pompe di calore geotermiche:*

- Scambiatori geotermici: sonde geotermiche verticali con diametro del tubo ad U pari a 31,8 mm;
- Disposizione degli scambiatori di tipo compatto (distanza minima tra i fori pari a 3,7 m);
- Pompe di calore ad alto livello di efficienza;

Si è quindi provveduto ad inserire nel software di dimensionamento RETscreen International GSHP3 le caratteristiche climatiche del luogo in esame ed i valori dei carichi termici di riscaldamento e raffrescamento.

I risultati forniti dal software di dimensionamento sono relativi ai seguenti parametri:

- Area di terreno tipica richiesta per l'installazione delle sonde;
- Lunghezza totale del pozzo di trivellazione;
- Energia prodotta dal sistema a pompe di calore geotermiche;
- Elettricità utilizzata per il funzionamento della pompa di calore e delle sonde geotermiche.

## Consumi e costi di esercizio

SISTEMA TRADIZIONALE (Scenario Base). Nel caso di utilizzo di un sistema di riscaldamento tradizionale, si dovrà utilizzare il gas naturale per la produzione dei 48,5 MWh necessari per il riscaldamento invernale (efficienza dell'85%), mentre per produrre i 16 MWh necessari per il raffrescamento estivo si ipotizza un impianto di climatizzazione utilizzando elettricità (COP = 3).

Tabella 1. Consumi "scenario base"

SCENARIO	CONSUMI (anno)	
	METANO	ELETTRICITA'
BASE	5983 m <sup>3</sup>	5,3 MWh
COSTI(€/anno)	2991,5	795

Ipotizzando costi unitari pari a 0,5 €/m<sup>3</sup> per il metano e di 0,15 €/kWh per l'energia elettrica, i costi totali annui di esercizio relativi allo scenario base possono essere considerati pari a **3.786,50 €/anno**.

Relativamente allo scenario base si hanno emissioni di CO<sub>2</sub> pari a:

- 0,239 t/MWh di energia prodotta per il riscaldamento con il gas naturale nella caldaia a condensazione;
- 0,164 t/MWh di energia prodotta per il raffrescamento con l'energia elettrica nel normale sistema di condizionamento.

Tabella 2. Emissioni annuali di CO<sub>2</sub> per lo scenario base.

	MWh consumati	Tonnellate CO <sub>2</sub> /anno
METANO	48,5	11,6
ELETTRICITA'	16	2,6
TOTALE		14,2

SISTEMA A POMPE DI CALORE GEOTERMICHE. In questo caso, per la produzione dei 46,8 MWh necessari per il riscaldamento del complesso edilizio, si utilizzerà l'energia elettrica (COP pari a 3,6), mentre per la produzione dei 16 MWh necessari per il raffrescamento, si utilizzerà ancora energia elettrica ma con un COP pari a 4,9.

Il sistema a pompa di calore geotermica presenta quindi un consumo totale di energia elettrica pari a 16,4 MWh.

Il COP medio è pari a circa 3,8, cioè con 1 MWh elettrico si producono 3,8 MWh termici.

Tabella 3. Consumi con pompe di calore ad alto rendimento

POMPE DI CALORE	CONSUMI	
	ELETTRICITA'	
	16,4 MWh	
COSTI (€anno)	2460	

I costi annui di esercizio possono dunque essere considerati in media pari a **2.460,00 €/anno**.

Utilizzando il sistema con pompe di calore ad alto rendimento si hanno emissioni di CO<sub>2</sub> pari a:

- 0,138 t/MWh di energia prodotta per il riscaldamento;
- 0,100 t/MWh di energia prodotta per il raffrescamento.

Tabella 4. Emissioni annue di CO<sub>2</sub> con pompe di calore ad alto rendimento.

	MWh prodotti	Ton. CO <sub>2</sub> /anno
RISCALDAMENTO	46,8	6,4
RAFFRESCAMENTO	16	1,6
TOT.		8

La riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> rispetto al sistema tradizionale è dunque di 5,2 t per il riscaldamento e 1,0 per il raffrescamento. La riduzione di emissioni totale è dunque di 6,2 t/anno.

Relativamente al dimensionamento delle sonde geotermiche, il software di dimensionamento ha determinato che la lunghezza richiesta per le sonde risulta pari a 561 m. Tale strumento di calcolo considera una lunghezza di 91 m per sonda, e conseguentemente, saranno necessarie circa 6 sonde.

## Costi di impianto

Per soddisfare i fabbisogni energetici di condizionamento del complesso edilizio oggetto del presente lavoro, a seguito del dimensionamento impiantistico, ipotizziamo l'impiego di una pompa di calore avente potenza termica pari a 30,6 kW e potenza frigorifera di 29,9 kW (figura 4).

Tale pompa di calore è specifica per la posa in interni, ed è progettata per prelevare calore attraverso un circuito chiuso di acqua glicolata, ad esempio dal terreno per mezzo di una sonda geotermica e fornirlo sotto forma di acqua calda.

Tale dispositivo è costituito da un blocco unico di volume contenuto, al quale si allacciano gli elementi dell'impianto di riscaldamento o di preparazione dell'acqua calda. Viene controllata la pressione del circuito della sonda geotermica per segnalare fughe di acqua glicolata. Evaporatore e condensatore sono costituiti da piastre d'acciaio inossidabile ad alte prestazioni termodinamiche.

Il costo della pompa di calore è pari ad **14.083,00 €**



Figura 4. La pompa di calore selezionata.

Sonde geotermiche. Per le trivellazioni con sonda geotermica verticale a circuito chiuso, una stima di massima di costo è la seguente:

- 35,00 € al metro (sonde incluse, posate e provate in pressione) per terreni facili (compatti);
- 45-50,00 € al metro (sonde incluse, posate e provate in pressione) per terreni normali non particolarmente duri o friabili/con sedimenti scomposti, senza falde d'acqua multiple nel sottosuolo;
- 65,00 Euro (o più) al metro per terreni difficili.

Da quanto sopra riportato, per la fornitura e la posa in opera delle sonde geotermiche abbiamo ipotizzato un costo medio pari a 50 €/m.

Conseguentemente, essendo, per quanto visto in precedenza, necessarie 6 sonde di lunghezza pari a 91 m ciascuna, il costo totale relativo alla fornitura e posa in opera delle sonde sarà circa pari a **27.300,00 €**

Il costo totale dell'impianto di condizionamento della palazzina C del complesso edilizio di Ponte Pattoli con pompa di calore geotermica, sarà quindi pari a **41.383,00 €**

Per quanto invece concerne lo "scenario base", ovvero il sistema tradizionale progettato per la palazzina, quest'ultimo consiste in un impianto di riscaldamento alimentato da una caldaia a condensazione per ogni singola unità abitativa all'interno della palazzina, e da un impianto di condizionamento standard per il raffrescamento estivo.

Caldaia a condensazione. Il prezzo di una singola caldaia è stato stimato pari a 2.500,00 € Ipotizzando quindi la presenza di una caldaia per ogni appartamento, il costo totale per la palazzina risulta pari a 12.500,00 €

Condizionamento estivo. Si prevede l'utilizzo di 3 condizionatori split per appartamento.

Il prezzo di un singolo apparato è di 1.380,00 €

Il costo totale del sistema di condizionamento sarà dunque pari a 20.700,00 €

Il costo totale relativo allo scenario base di riscaldamento/raffrescamento della palazzina C del complesso di Ponte Pattoli, sarà quindi pari a 33.200,00 €

Da quanto sopra riportato, possiamo quindi effettuare un confronto tra i costi di impianto dei due sistemi:

Tabella 5. Confronto tra i costi di impianto

	<i>Sistema tradizionale</i>	<i>Pompe geotermiche</i>	<i>Confronto</i>
<i>Costi (€)</i>	<i>33.200,00</i>	<i>41.383,00</i>	<i>8.183,00</i>

Utilizzando le pompe di calore geotermiche si avrà dunque un extra costo pari a 8.183,00 €, pari a circa il 24,6 % in più, rispetto al costo dell'impianto di condizionamento tradizionale.

Per valutare il pay back dell'extra costo impiantistico è quindi necessario richiamare i costi d'esercizio dei due sistemi analizzati, riportati in tabella 6.

Tabella 6. Riepilogo dei costi e dei risparmi.

	CH4 (€/anno)	ELETTR. (€/anno)	TOT. (€/anno)	RISPARMI (€/anno)
SISTEMA BASE	2.991,5	795,00	3.786,50	/
PdC ALTA EFFIC.	0	2.460,00	2.460,00	1.326,50

Il tempo di ritorno può essere quindi calcolato dividendo l'extracosto pari a 8.183,00 €, per il risparmio annuo relativo ai costi di esercizio impiantistici, pari a 1.326,50 €

Da quanto sopra esposto, per l'impianto a pompa di calore geotermica dimensionato nel presente lavoro, si ottiene un tempo di ritorno dell'extra costo pari a circa 6 anni.

## APPLICAZIONE DI TRNSYS AL SISTEMA DI POMPE GEOTERMICHE

Una volta dimensionato l'impianto di pompe geotermiche tramite l'utilizzo del software RETScreen sono state fatte alcune simulazioni numeriche dello stesso tramite l'utilizzo del programma di simulazione dei transienti termici TRNSYS (figura 5).

Inserendo le caratteristiche climatiche del luogo è stato ricavato il comportamento termico del terreno durante l'anno ad una profondità di 0.25 m. L'andamento di tali temperature è riportato in arancione in figura 6. E' stato anche ricavato l'andamento della temperatura del volume di terreno contenente le sonde geotermiche e funzionante da contenitore termico (Figura 6 in viola).

Utilizzando poi le caratteristiche tecniche del sistema di pompe di calore geotermiche scelto per il complesso immobiliare in località Ponte Pattoli è stato realizzato un modello virtuale in TRNSYS.

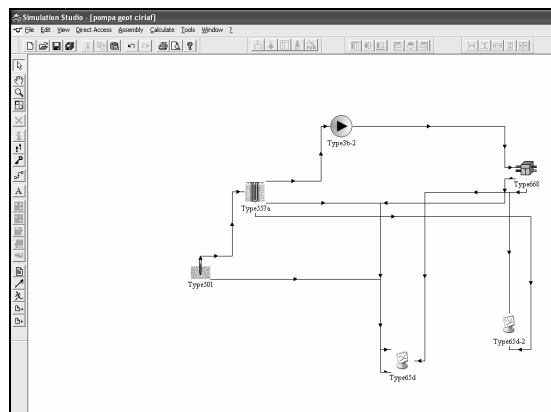


Figura 5: Schema di impianto in TRNSYS

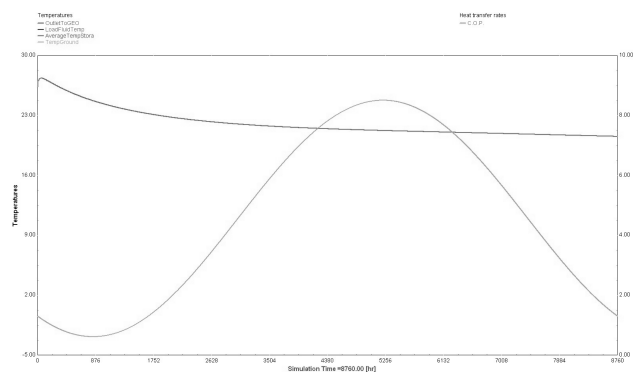


Figura 6: Andamento annuale della temperatura media del suolo.

Tale modello prescinde dalla presenza dell'impianto di distribuzione del calore-freddo all'interno dell'edificio, ma considera solamente la sezione di impianto concernente la pompa geotermica ed lo scambio di calore col terreno tramite le sonde.

In figura 7 sono mostrati gli andamenti delle temperature del terreno contenente le sonde (in viola), di quello superficiale (in arancione), del fluido (acqua e glicole) circolante all'interno delle sonde (in rosso) e dell'acqua dell'impianto di riscaldamento in uscita dalla pompa di calore (in blu) durante i primi tre mesi dell'anno, quando l'impianto fornisce calore all'edificio.

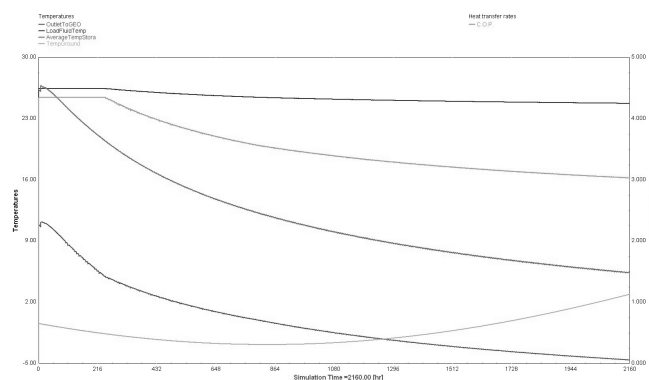


Figura 7: Andamento delle temperature nel periodo invernale.

Questo tipo di modello mostra come l'acqua di riscaldamento si mantenga ad una temperatura di circa 28°C, ideale per un impianto di riscaldamento a pavimento. Il volume del suolo che funge da contenitore delle sonde geotermiche e che si comporta come un contenitore di calore si raffredda progressivamente durante il periodo di funzionamento dell'impianto.

Il C.O.P si mantiene sempre sopra a 3.

Nel funzionamento estivo, quando la pompa di calore opera a ciclo invertito, producendo acqua fredda per il raffrescamento dell'immobile, sono stati ricavati gli andamenti delle temperature mostrati in figura 8.

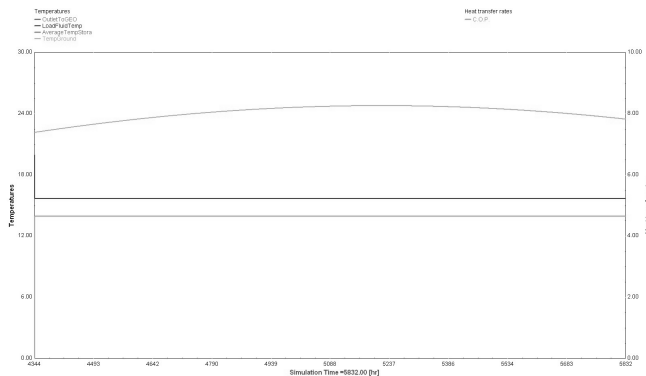


Figura 8: Andamento delle temperature nel periodo estivo.

E' possibile notare un progressivo riscaldamento del terreno ad una profondità di 0.25 m a metà del mese di agosto fino a valori massimi di circa 24°C per poi diminuire verso la fine del mese. L'acqua di distribuzione del freddo, circolante nel sistema di pannelli radianti a pavimento è raffreddata e mantenuta ad una temperatura costante di circa 15°C.

Il C.O.P. si mantiene sopra 4.

In figura 9 sono riportate le potenze medie trasferite dall'acqua di raffreddamento circolante nei pannelli pavimento (in blu), quella trasferita dal condensatore al fluido circolante nelle sonde geotermiche e quella assorbita dal terreno (in arancione).

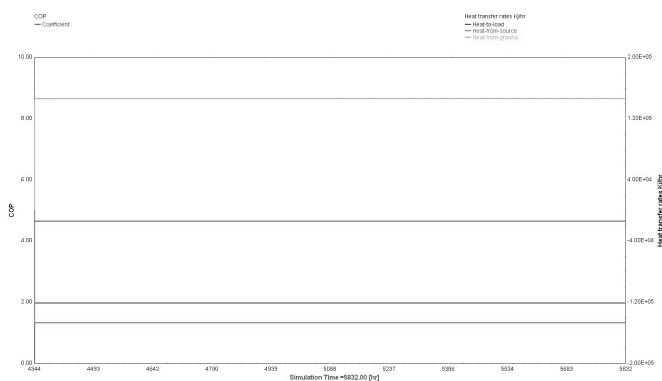


Figura 9. Potenze caso estivo.

L'impianto assorbe 38 kW di potenza dall'acqua di raffreddamento e la trasferisce al terreno utilizzando circa 6 kW di potenza elettrica.

Comportamento del tutto analogo è quello dell'impianto durante il periodo invernale quando la pompa geotermica assorbe calore dal terreno per trasferirla all'acqua di mandata.

## CONCLUSIONI

L'analisi effettuata in questo lavoro ha avuto come oggetto lo studio di pre-fattibilità dell'applicazione di un sistema di riscaldamento – raffrescamento a pompa di calore geotermica ad un edificio plurifamiliare (palazzina C del complesso residenziale di Ponte Pattoli-PG).

Tale studio è stato finalizzato alla quantificazione dei risparmi energetici conseguibili in termini di mancato utilizzo di combustibili fossili, e la conseguente stima della riduzione delle emissioni di gas serra rispetto al sistema base già previsto nella palazzina. Tale scenario base è rappresentato dall'attuale sistema di riscaldamento – raffrescamento utilizzato nel complesso residenziale di Ponte Pattoli, che utilizza un sistema di riscaldamento con caldaia a condensazione e un sistema di raffrescamento standard.

Tale dimensionamento è stato effettuato utilizzando il software RETscreen International GSHP3.

Le principali conclusioni raggiunte dal presente lavoro sono:

- elevata riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> conseguibili grazie al sistema con pompe di calore geotermiche, pari a 8 tCO<sub>2</sub>/anno;
- importante riduzione dei consumi energetici per il condizionamento dell'edificio;
- tempo di ritorno dell'extra costo impiantistico pari a 6 anni;
- i maggiori costi per la realizzazione dell'impianto con pompa di calore geotermica sono quelli dovuti alla fornitura e posa in opera delle sonde geotermiche verticali.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Hutter G. W., "Geothermal heat pumps: an increasingly successful technology", Renewable Energy, Vol 10, No. 2/3
2. Tomasz Sliwa, Jaroslaw Kotyza, "Application of existing wells as round heat source for heat pumps in Poland", Applied Energy 74 (2003)
3. Piccolino Boniforti Andrea, "Applicazione della metodologia di certificazione energetica secondo la direttiva 2002/91/CE e il suo recepimento d.lgs. 192/05 a cinque complessi immobiliari", Tesi di laurea, Facoltà di Ingegneria per l'ambiente e il territorio, Perugia;
4. Leyla Ozgener, Arif Hepbasli, Ibrahim Dincer, "Performance investigation of two geothermal district heating systems for building applications: Energy analysis", Energy and Buildings 38 (2006)
5. Michaelis Karagiorgas, Dimitrios Mendrinias, Constantine Karytsas, "Solar and geothermal Heating and cooling of the European centre for public law building n Greece", Renewable Energy 29 (2003)
6. Arif Hepbasli, Leyla Ozganer, "Development of geothermal energy utilization in Turkey: a review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 8 (2004)
7. Christoph Clauser, "Geothermal energy use in Germany-status and potential", Geothermics Vol. 26, No 2
8. Borsellini, "Scienze della terra", Ed. Bovolenta
9. "Costruire Impianti", Novembre 2006 n.40
10. AA.VV., "Metodologie di risparmio energetico", editore ULRICO HOEPLI Milano
11. M. Felli, "Lezioni di fisica tecnica 1", Morlacchi editore

**EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI SCALDACQUA ELETTRICI  
AD ACCUMULO PER USO DOMESTICO:  
PROGETTO DI NORMA EUROPEA prEN 50440, METODI DI PROVA  
E ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI NEL LABORATORIO PROVE R&D  
DELLA MTS GROUP**

Umberto Desideri<sup>(1)</sup>, Piero Lunghi<sup>(1)</sup>, Stefania Proietti<sup>(1)</sup>, Angelo Mancini<sup>(2)</sup>, Patrizia Terzoni<sup>(2)</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia  
Via G. Duranti 67 - 06125 Perugia Tel. +390755853740, Fax +390755853736  
E-mail stefania@unipg.it

<sup>2</sup> MTS Group Laboratorio prove R&D, Via Pascoli 1 - 60044 Fabriano (AN)  
Tel. +39 0732 602237 Fax: +39 0732 628200

## SOMMARIO

Il risparmio e l'efficienza energetica rientrano nella strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura. La Commissione Europea ha individuato 14 gruppi di prodotti, utilizzando energia elettrica, da sottoporre ad analisi, fra cui gli scaldacqua elettrici, per poi porre dei requisiti energetici da far approvare entro il 2008.

In questo lavoro viene descritto il metodo di prova per il calcolo dell'efficienza degli scaldacqua elettrici ad accumulo secondo il progetto di Norma Europea prEN 50440, si illustrano una serie di modifiche apportate agli apparecchi per migliorarne l'efficienza e attraverso tre metodi di confronto (efficienza energetica, costi di uso annuali, etichettatura energetica) si analizzano i risultati ottenuti.

Le analisi effettuate, sia teoriche che sperimentali, hanno avuto come obiettivo la quantificazione del risparmio energetico ottenibile con i nuovi modelli. Infine è stata condotta una analisi critica sul percorso normativo di etichettatura degli apparecchi oggetto del presente lavoro.

## INTRODUZIONE

Per un Paese come il nostro, povero di fonti di energia tradizionali, risparmiare energia significa contribuire a contenere la spesa pubblica e rendere la Comunità Europea meno dipendente dall'Estero per gli approvvigionamenti energetici. Infatti le proiezioni basate sulle attuali politiche indicano che entro il 2030 la dipendenza dell'Europa dalle importazioni di energia raggiungerà il 70% circa del suo fabbisogno totale. Di conseguenza uno dei più grandi obiettivi della Comunità Europea è di tagliare i consumi energetici del 20% entro il 2020 [1]. Questo in quanto risparmiare energia non è solo una questione economica: la sua produzione ha sempre un forte impatto sull'ambiente e sulla salute umana a causa dei gas climalteranti e dei prodotti di scarto della combustione che vengono immessi nell'atmosfera.

La Commissione Europea si sta quindi impegnando a tutti i livelli per raggiungere gli obiettivi prefissati: sostenibilità ambientale, competitività e sicurezza dell'approvvigionamento.

Per lo studio affrontato [2] nel presente lavoro assume importanza la Direttiva EUP 2005/32/CE [3] che ha lo scopo di promuovere un quadro per l'integrazione degli aspetti ambientali nella progettazione delle apparecchiature, lasciando a specifiche Direttive della Commissione (Misure di Implementazione) il compito di trattare le singole categorie di prodotto.

Sono stati individuati 14 gruppi di prodotti da sottoporre ad analisi: serbatoi di acqua calda e affini, *scaldacqua*, computer, apparecchi per l'immagine (fax, scanner, fotocamere...), televisioni, standby, batterie e affini, fonti di illuminazione,

illuminazione di strade pubbliche, condizionatori d'aria, motori e affini, macchine commerciali del freddo, frigoriferi, congelatori e loro combinazioni, lavastoviglie, lavatrici, essiccatori e affini.

Per quanto riguarda gli scaldacqua elettrici ad accumulo per uso domestico si sono incontrate molte difficoltà nel definire una metodologia di analisi dell'efficienza e quindi creare un labeling energetico che rispecchi il vero utilizzo di questi prodotti. La Norma Europea attualmente in vigore è la EN 60379 [4] riguardante i "metodi per misurare le prestazioni di scaldacqua elettrici ad accumulo per uso domestico"; questa non prevede metodi di misura basati su un fabbisogno realistico dell'acqua calda sanitaria. Per poter raggiungere gli obiettivi prefissati è al vaglio un progetto di Norma Europea prEN 50440 [5], in sostituzione della EN 60379, riguardante una metodologia di calcolo dell'efficienza degli scaldacqua elettrici ad accumulo, basata su ipotesi di profili di prelievo dell'acqua. È proprio su questo progetto di norma che si basa il lavoro effettuato in questo studio.

La MTS Group ha realizzato, all'interno del Laboratorio Prove di Fabriano, una "camera climatica" che risponde ai requisiti previsti dalla prEN 50440. Attualmente i laboratori attivi in questo specifico studio sono tre in Europa:

- 1) MTS Group (Italia);
- 2) ATLANTIC Group (Francia);
- 3) STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG (Germania).

La "Camera climatica" è provvista di un sistema di acquisizione, elaborazione e controllo che consente di monitorare, istante per istante, tutti vari step della prova, di ottenere in tempo reale i dati rilasciati dalla macchina, nonché di gestire le modalità di prova.

## MODALITÀ DI PROVA E MISURE EFFETTUATE SECONDO LA prEN 50440

La Norma prEN 50440, in base alla capacità caratteristica  $C_R$  degli scaldacqua elettrici ad accumulo, classifica questi apparecchi in due categorie:

- 1) Categoria 1:  $C_R < 45$  litri;
- 2) Categoria 2:  $C_R \geq 45$  litri.

Ogni categoria è trattata con modalità di prova differente. In questa sede verrà analizzata esclusivamente la prima.

La prova viene effettuata utilizzando un termostato elettronico in sostituzione di quello previsto dallo scaldacqua.

### Scaldacqua con capacità nominale inferiore ai 45 litri (secondo prEN 50440)

**Riscaldamento.** Al tempo  $t_1$  si ha l'accensione dello scaldabagno fino al tempo  $t_2$  che rappresenta il momento in cui si ha la prima disinserzione del termostato di riferimento che dovrà registrare una temperatura di  $65 -0/+ 1^\circ\text{C}$  e si registrerà l'energia di riscaldamento  $E_{\text{risc}}$  [kWh].

**Prelievo di acqua e ciclo di 24 ore.** Durante tutto lo step 4 lo scaldacqua rimane attivo. Questo step prevede due fasi:

1) **Ciclo di prelievo:** La norma prevede una energia di prelievo  $E_{\text{WATER}}$  pari a 2.1 kWh corrispondenti a 36 l/g a  $60^\circ\text{C}$ . L'esecuzione del prelievo può avvenire con due modalità:

a. prelievo normale (serie di piccoli spillamenti distanziati nel tempo);

b. prelievo semplificato (tre prelievi distanziati nel tempo).

La velocità di prelievo varia in base alla capacità dello scaldabagno, 2 l/mm per capacità nominale  $< 10$  litri, 5 l/mm per capacità nominale tra 10 e 45 litri.

Viene calcolata l'energia termica prelevata,  $E_{\text{WATERreal}}$  utilizzando la seguente equazione:

$$E_{\text{WATERreal}} = \sum_{i=1}^n 1,9184 \cdot 10^{-5} \cdot v_i (\theta_{Si} - \theta_{Ci}) \cdot (t_i - t_{(i-1)}) \quad (1)$$

dove:

- $v_i$  = velocità di prelievo all'istante  $i$  [l/mm];
- $\theta_{Si}$  = temperatura dell'acqua al duomo un istante prima del prelievo [ $^\circ\text{C}$ ];
- $\theta_{Ci}$  = temperatura dell'acqua fredda inserita all'istante del prelievo [ $^\circ\text{C}$ ];
- $t_i - t_{(i-1)}$  = durata del prelievo [sec].

2) **Mantenimento in temperatura:** Al tempo  $t_4$  inizia un periodo di mantenimento in cui il sistema viene fatto stabilizzare senza ulteriori prelievi.

Il software calcolerà l'energia necessaria al riscaldamento e al mantenimento delle condizioni calde, normalizzata al tempo di 24 h,  $E_{\text{HEAT}}$ :

$$E_{\text{HEAT}} = (E_{v\_small} - E_{\text{WATERreal}}) \cdot \left( \frac{24}{t_5 - t_3} \right) \quad (2)$$

Indicando con  $\theta_{\text{out1A}}$  la temperatura  $\theta_{\text{AA}}$  registrata al tempo  $t_3$  e con  $\theta_{\text{outN}}$  la temperatura di ultima disinserzione del termostato, cioè al tempo  $t_5$ , si corregge  $E_{\text{HEAT}}$  [kWh] tenendo conto della deriva termica di inizio (3) - fine (5):

$$E_{\text{HEATcorr}} = E_{\text{HEAT}} + \frac{1,16 \cdot C_{act} \cdot (\theta_{\text{outN}} - \theta_{\text{out1A}})}{1000} \quad (3)$$

dove  $C_{act}$  è la capacità reale dello scaldacqua [l].

In definitiva verrà calcolata l'energia consumata durante il ciclo  $E_{ab}$  regolarizzando la differenza di temperatura tra temperatura ambiente ( $\theta_{amb}$ ) e temperatura media al duomo ( $\theta_M$ ) a  $45^\circ\text{C}$ , il rendimento  $\eta$  dello scaldacqua e le perdite termiche per ciclo  $Q_l$ :

$$E_{ab} = E_{\text{HEATcorr}} \cdot \frac{45}{\theta_M - \theta_{amb}} + E_{\text{WATER}} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{E_{\text{WATER}}}{E_{ab}} \quad (5)$$

$$Q_l = E_{ab} - E_{\text{WATER}} \quad (6)$$

dove:

-  $\theta_M$  [ $^\circ\text{C}$ ] è la temperatura media al duomo considerando le temperature di inserzione e disinserzione registrate durante lo step;

-  $E_{\text{WATER}} = 2.1$  [kWh] (valore imposto dalla norma per scaldacqua con capacità  $< 45$  litri).

**Perdite di energia (standby-loss) secondo la norma EN 60379.** Il progetto di norma EN 50440 rimanda alla norma europea in vigore EN 60379 "Methods for measuring the performance of electric storage water-heaters for household purpose" per la misura delle perdite di energia.

Il sistema di acquisizione dati registra il consumo di energia durante lo standby loss ( $E_1$ ), i tempi di inizio-fine ciclo ( $t_5 - t_6$ ) e le temperature di inserzione ( $\theta_{\text{in}}$ ) e disinserzione ( $\theta_{\text{out}}$ ) del termostato per poi calcolare la temperatura media al duomo ( $\theta_M$ ).

Attraverso questi dati il software determinerà la dispersione permanente in 24 h,  $Q_{pr}$ , tenendo conto della deriva termica di inizio-fine ciclo, normalizzando la durata del ciclo a 24 ore e regolarizzando a  $45^\circ\text{C}$  la differenza di temperatura tra  $\theta_{amb}$  e  $\theta_M$ :

$$Q_{pr} = \frac{45}{(\theta_M - \theta_{amb})} \cdot \frac{24}{(t_5 - t_6)} \cdot E_1 + \frac{1,16 \cdot C_{act} \cdot (\theta_{\text{out1}} - \theta_{\text{outn}})}{1000} \quad (7)$$

dove:

- $\theta_M$  è la temperatura media al duomo [ $^\circ\text{C}$ ];
- $\theta_{amb}$  è la temperatura ambiente [ $^\circ\text{C}$ ];
- $C_{act}$  è la capacità reale dello scaldacqua [l];
- $\theta_{\text{out1}}$  è la temperatura registrata al tempo  $t_5$ , denominata nel punto precedente  $\theta_{\text{outN}}$  [ $^\circ\text{C}$ ];
- $\theta_{\text{outn}}$  è la temperatura registrata al tempo  $t_6$  [ $^\circ\text{C}$ ].

**Quantità di acqua utile prelevabile.** Al tempo  $t_6$ , lo scaldacqua viene spento. A questo punto viene prelevata l'acqua, rifornendo lo scaldabagno con acqua fredda all'ingresso. Il prelievo durerà fin tanto che non si registra una temperatura dell'acqua in uscita pari a  $40^\circ\text{C}$ ; con  $t_7$  sarà denominato l'istante in cui si arriva a tale valore, nonché termine della prova.

La quantità  $V_{40\_exp}$  corrisponde alla quantità di acqua utile prelevata ed è registrata dal software grazie ad un misuratore di portata posto lungo la tubazione di uscita.

Il sistema registra anche la temperatura media dell'acqua allo scarico  $\theta_p$  [ $^\circ\text{C}$ ], la temperatura media dell'acqua al duomo dopo la disinserzione del termostato  $\theta_{\text{outM}}$  [ $^\circ\text{C}$ ] e la temperatura dell'acqua in ingresso  $\theta_c$  [ $^\circ\text{C}$ ], grandezze che servono per il calcolo della temperatura media del prelievo  $\theta_p$  [ $^\circ\text{C}$ ] allo scarico:

$$\theta_p = 50 \cdot \frac{\theta'_p - \theta_c}{\theta_{outM} - \theta_c} + 15 \quad (8)$$

In definitiva la quantità utile di acqua a 40°C,  $V_{40}$  risulta:

$$V_{40} = V_{40\_exp} \cdot \frac{(\theta_p - 15)}{(40 - 15)} \quad (9)$$

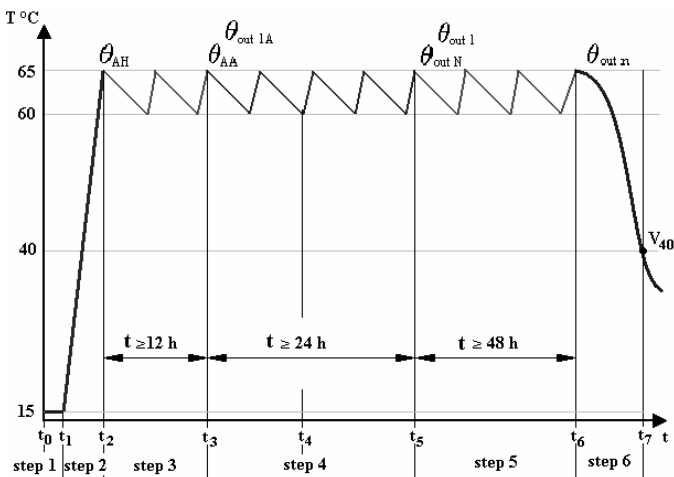


Figura 1 : Prova su scaldacqua con capacità < 45 litri.

## TIPOLOGIE DI SCALDACQUA SOTTOPOSTI AL TEST

I modelli di scaldacqua analizzati in questo studio sono stati modificati in alcune componenti, o dove non è stato possibile, attraverso alcune ipotesi, per poter valutare l'effettivo miglioramento delle prestazioni facendo un paragone con i prodotti attualmente presenti sul mercato. Le tipologie individuate sono:

1. Standard (STD): prodotto attualmente commercializzato;
2. Innovativo (HE): scaldacqua standard con resistenza e deflettore ottimizzati;
3. Superisolato (Si): scaldacqua standard con spessore dell'isolamento aumentato.

### Scaldacqua Innovativo

Per questa tipologia sono state apportate modifiche su due componenti meccaniche:

1. Resistenza elettrica;
2. Deflettore ingresso acqua.

**Resistenza elettrica.** La resistenza elettrica è l'elemento riscaldante dell'apparecchio. L'acqua riscaldata, diminuendo di densità tende a salire verso l'alto, mentre l'acqua fredda rimane nella parte bassa. Si crea così una stratificazione dell'acqua all'interno della caldaia in cui la temperatura aumenta salendo verso l'alto. La modifica apportata consiste nella sostituzione della attuale resistenza, denominata "standard", con una nuova denominata "ribassata". Com'è possibile notare dagli schemi in figura 2 e 3, questa sostituzione permette di collocare l'elemento riscaldante più in basso rispetto ad una tipologia "standard" iniziando il riscaldamento in una zona di stratificazione a temperatura inferiore. Di conseguenza il volume di acqua sovrastante la "ribassata" è maggiore rispetto alla resistenza "standard".

Questa modifica porta ad avere una energia di riscaldamento leggermente più grande, ma essendo il volume di acqua interessato maggiore, si ha la possibilità di prelevare un volume di acqua utile a 40 °C ( $V_{40}$ ) più elevato.

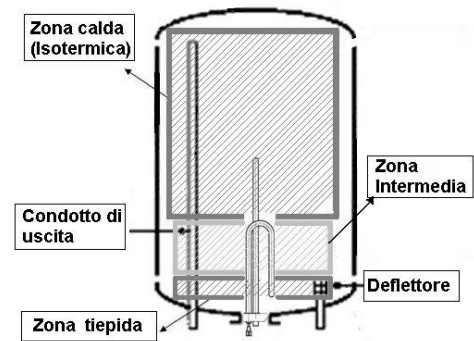


Figura 2 : Resistenza standard.

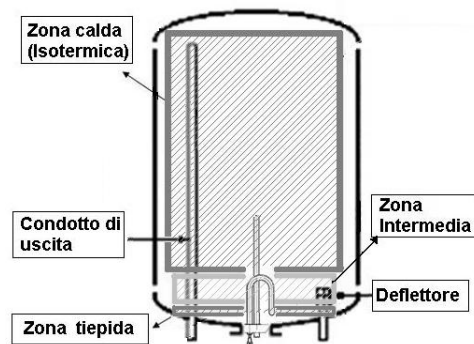


Figura 3 : Resistenza ribassata.

**Deflettore.** Il deflettore è la componente meccanica adibita a convogliare il getto di acqua fredda proveniente dalla tubazione di ingresso, all'interno della caldaia (figura 4).

Il deflettore attuale è in acciaio inossidabile e verrà sostituito con uno nuovo. Il deflettore inox è provvisto di aperture circolari che provocano getti di acqua a raggiera e inclinati verso l'alto. Il nuovo deflettore, invece, ha aperture rettangolari più ampie rispetto ai fori del deflettore inox. Queste aperture provocano getti di acqua non più a raggiera ma a ventaglio, dirigendo il getto più in basso. La sostituzione permette di aumentare il volume di acqua utile prelevabile a 40 °C ( $V_{40}$ ).

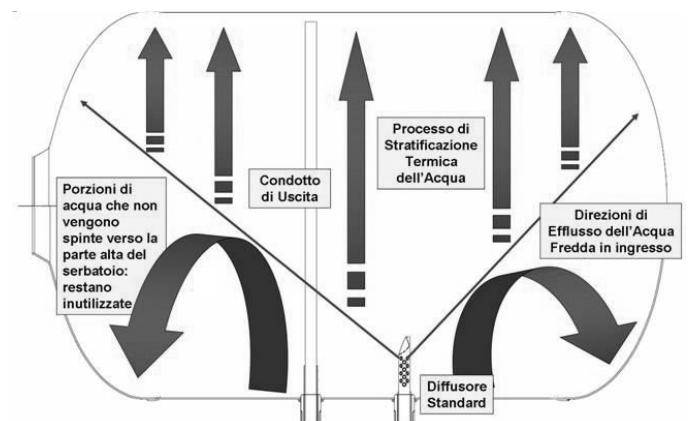


Figura 4 : Funzionalità del deflettore.

## Scaldacqua Superisolato.

Tutti gli scaldabagni elettrici oggetti di questo studio utilizzano, come isolante termico, una schiuma di poliuretano espanso ad alta densità. Una ottima coibentazione porta alla riduzione della dispersione termica (Standing losses). La modifica sull'isolamento consiste nell'aumentare lo spessore del poliuretano.

## ANALISI DEI RISULTATI

I benefici apportati con l'introduzione delle varie modifiche sono stati valutati secondo tre diversi modelli di confronto:

1. *Analisi dell'efficienza energetica*: si basa sul rendimento energetico dello scaldacqua considerando diversi parametri di efficienza;

2. *Analisi dei costi di uso annuali*: si considera la spesa annuale che il consumatore dovrà sostenere seguendo diverse ipotesi di utilizzo;

3. *Etichettatura energetica*: si pone un confronto con quattro esempi di norma per poter valutare la classe energetica di appartenenza.

### Analisi dell'efficienza energetica

Questo tipo di analisi prende in considerazione il rendimento dello scaldacqua seguendo due condizioni di lavoro ed elaborando diversi parametri per il confronto.

Le grandezze misurate in camera climatica che interessano per questa analisi sono:

-  $E_{risc}$  [kWh]: energia di riscaldamento, cioè l'energia necessaria all'apparecchio per poter riscaldare l'acqua portandola da 15°C a 65°C (oppure 75°C od 85°C);

-  $Q_{pr}$  [kWh/g]: dispersione permanente in 24 ore (standing losses), cioè l'energia necessaria all'apparecchio per mantenere l'acqua in condizioni calde;

-  $V_{40}$  [l]: quantità di acqua utile prelevabile a 40°C;

-  $E(V_{40})$  [kWh]: energia equivalente al  $V_{40}$ . Non è un dato ottenuto direttamente dal software di gestione, ma è facilmente ricavabile dalla seguente equazione:

$$E(V_{40}) = \frac{V_{40} \cdot 4186 \cdot 25}{3600000} \quad (10)$$

dove 4186 è il calore specifico dell'acqua [J/Kg°C] e 25 è la differenza tra temperatura al duomo e temperatura dell'acqua in entrata (40°C-15°C).

Le due condizioni di lavoro dello scaldacqua sono:

1. Condizioni transitorie;
2. Condizioni a regime.

Condizioni transitorie. Questo stato si ha solo nel caso in cui l'apparecchio venga acceso per un normale ciclo giornaliero di utilizzo e poi spento a fine giornata. In questo caso l'energia che viene ceduta all'apparecchio sarà l'energia di riscaldamento ( $E_{risc}$ ) più l'energia corrispondente alla dispersione termica in 24 ore ( $Q_{pr}$ ).

Condizioni a regime. Questo stato si ha quando l'apparecchio non viene mai spento, ma si mantiene sempre l'acqua in condizioni calde. L'energia fornita allo scaldacqua è data dall'energia prelevata tramite gli spillamenti ( $V_{40}$ ) e dalla dispersione termica.

I parametri di consumo che entreranno in gioco nella valutazione del rendimento energetico sono pertanto:

1.  $E_{cons\_trans}$  [kWh], energia consumata dall'apparecchio in condizioni transitorie:

$$E_{cons\_trans} = E_{risc} + Q_{pr} \quad (11)$$

2.  $E_{cons\_stead}$  [kWh/g], energia consumata dall'apparecchio in condizioni di regime:

$$E_{cons\_stead} = E(V_{40}) + Q_{pr} \quad (12)$$

3.  $E_{cons\_std}$  [kWh/g], energia consumata dall'apparecchio per fornire la quantità di energia  $E_{WATER}$  attribuita dalla norma per quello specifico scaldacqua in condizioni di regime:

$$E_{cons\_std} = E_{WATER} + Q_{pr} \quad (13)$$

Ad ogni parametro di consumo è associato un rendimento energetico:

1.  $\eta_{trans}$ , rendimento energetico in condizioni transitorie, definito come rapporto tra l'energia reale prelevata utilizzabile (40°C) e totale fornita in condizioni transitorie:

$$\eta_{trans} = \frac{E(V_{40})}{E_{cons\_trans}} = \frac{E(V_{40})}{E_{risc} + Q_{pr}} \quad (14)$$

2.  $\eta_{stead}$ , rendimento energetico in condizioni di regime, definito come rapporto tra l'energia reale prelevata utilizzabile (40°C) e totale fornita in condizioni di regime:

$$\eta_{stead} = \frac{E(V_{40})}{E_{cons\_stead}} = \frac{E(V_{40})}{E(V_{40}) + Q_{pr}} \quad (15)$$

3.  $\eta_{std}$ , rendimento energetico in condizioni di prelievo standard, definito come rapporto tra l'energia richiesta dalla norma ( $E_{WATER}$ ) e totale fornita per ottenere l'energia richiesta ( $E_{WATER}$  e dispersione):

$$\eta_{std} = \frac{E_{WATER}}{E_{cons\_std}} = \frac{E_{WATER}}{E_{WATER} + Q_{pr}} \quad (16)$$

Un quarto parametro di efficienza è il rapporto tra l'energia reale prelevata utilizzabile ( a 40°C) e l'energia massima stoccabile nel serbatoio:

$$\eta_{max} = \frac{E(V_{40})}{E_{max\_H_2O}} = E(V_{40}) \cdot \frac{3600000}{C_R \cdot (T_R - 15) \cdot 4186} \quad (17)$$

dove  $C_R$  è la capacità nominale dell'apparecchio e  $T_R$  è la temperatura di esercizio (65, 75 o 85°C).

Il prodotto standard (STD) è la tipologia base di confronto. Il paragone viene effettuato ponendo come parametro fisso la quantità di acqua utile prelevabile  $V_{40}$ , ottenuta da un apparecchio standard alla temperatura di 65°C.

I termini  $\Delta\eta$  presenti in tabella 1 fanno riferimento ai parametri di efficienza da cui prendono il nome. Questi sono le differenze percentuali di rendimento energetico che si hanno rispetto al prodotto presente attualmente sul mercato (STD):

$$\Delta\eta = \frac{\eta_{STD} - \eta_i}{\eta_i} \cdot 100 \quad (18)$$

con  $i = \text{HE, Si, HE + Si}$ .

**Conclusioni.** Un prodotto Innovativo (HE) produce la stessa quantità di acqua utile prelevabile  $V_{40}$  di un prodotto standard termostatando lo scaldacqua ad una temperatura minore. Questo comporta una diminuzione dell'energia di riscaldamento e una diminuzione del  $Q_{pr}$ . La termostatazione ad una temperatura più bassa apporta un miglioramento del rendimento energetico: 8% in condizioni transitorie, 3% in condizioni di regime e 4% nel caso di utilizzo di un  $E_{\text{water}}$  imposto.

Un prodotto Superisolato (Si) produce la stessa quantità di acqua utile prelevabile di un prodotto standard termostato alla stessa temperatura (65°C). La maggiore coibentazione porta ad un miglioramento della dispersione termica che comporta un aumento del rendimento del 5% in condizioni transitorie, del 6% in condizioni di regime e dell'8% in condizioni di uso standard.

Un modello HE + Si unisce i benefici apportati sia dall'ottimizzazione del deflettore e resistenza sia dall'aumento dello strato isolante.

Un'ultima osservazione riguarda il rapporto  $E(V_{40})/E_{\text{max\_H2O}}$ . Come si può notare il miglioramento si ha solo per il prodotto HE e suoi derivati. Questo fenomeno è facilmente spiegabile dalla dipendenza dell' $E_{\text{max\_H2O}}$  dalla temperatura di termostatazione, unica variabile che entra in gioco in questo rapporto. Solo un prodotto Innovativo varia la temperatura di esercizio e quindi solo in questi casi si ha un miglioramento del rendimento massimo ottenibile.

Tabella 1 : Miglioramenti percentuali di efficienza.

Modello	PARAMETRI DI EFFICIENZA			
	Condizioni transitorie $\Delta\eta_{\text{trans}}$ [%]	Condizioni di regime $\Delta\eta_{\text{trans}}$ [%]	Condizioni di uso standard $\Delta\eta_{\text{trans}}$ [%]	$E(V_{40})/E_{\text{max\_H2O}}$ [%]
STD	-	-	-	-
HE	8	3	4	9
Si	5	6	8	0
HE + Si	13	8	11	9

### Analisi dei costi di uso annuali

Si cerca di stabilire quanto un ipotetico utente potrebbe risparmiare in un anno, a livello di costo del consumo energetico, installando i nuovi prodotti. Il confronto verrà effettuato considerando il  $V_{40}$  prodotto a 65°C da un apparecchio standard e tutte le altre tipologie, nonché le diverse ipotesi di programmazione saranno paragonate a questo valore.

La spesa annuale per un utilizzo in condizione di regime senza programmazione è data da:

$$\text{Energy\_cost} = 335 \cdot 0,2 \cdot (E(V_{40}) + Q_{pr}) \quad (19)$$

in cui:

- 335 sono i giorni di utilizzo ipotizzati, considerando 1 mese di fermo macchina;

- 0,2 è il costo dell'energia espresso in €/kWh;
- $E(V_{40}) + Q_{pr}$  in [kWh/g] è il consumo giornaliero in condizioni di regime.

Si pone come termine di confronto la spesa annuale sostenuta per un prodotto standard in condizione di regime che produce una certa quantità di acqua utile prelevabile  $V_{40}$  con termostatazione a 65°C e si procede alla stima del risparmio economico riportato in tabella 2.

Tabella 2 : Miglioramenti percentuali di costo.

Modello	Miglioramento percentuale
STD	-
HE	3
Si	6
HE + Si	8

Come è facile individuare dalla tabella 2 il maggiore risparmio si ha nelle tipologie di prodotto che consentono di abbassare la temperatura di termostatazione.

### Etichettatura energetica

La strategia adottata agli inizi degli anni Novanta è stata di fornire informazioni al consumatore e dirigere le sue scelte di acquisto e installazione verso i modelli più efficaci e con minor impatto ambientale tramite un'etichettatura obbligatoria, e allo stesso tempo di eliminare gradualmente dal mercato i modelli meno efficienti tramite norme obbligatorie di minimo rendimento. Nel 1992 è stata adottata la Direttiva quadro per l'introduzione di direttive di applicazione per l'etichettatura degli elettrodomestici (92/75/EC).

La Direttiva CE riguarda frigoriferi e congelatori, lavabiancheria ed essiccatori, lavastoviglie, forni, scaldacqua e serbatoi di acqua calda, fonti di illuminazione, condizionatori d'aria.

Per quanto riguarda gli scaldacqua elettrici ad accumulo per uso domestico, l'etichettatura energetica non è stata ancora introdotta. All'interno del progetto SAVE 2000 (1998-2002) è stata proposta una direttiva europea per la loro etichettatura, ma il progetto è decaduto a causa delle difficoltà di confrontare i vari sistemi di scaldacqua e della mancanza di metodi di misura basati su un uso realistico dell'acqua calda, nonché a causa di una definizione di classi energetiche troppo restrittiva e poco rappresentativa della reale situazione del mercato.

La crescente sensibilizzazione su un uso razionale dell'energia, la necessità di ridurre il consumo energetico per ovvie ragioni ambientali e politiche, l'introduzione della prEN 50440, della Direttiva EUP 2005/32/CE e di altre Direttive riguardanti l'etichettatura energetica di svariati prodotti (come gli edifici - Dgl 192, Dgl 311, Direttiva 2002/91/CE Energy Performance Building Directive) creano i presupposti per l'introduzione di una Etichettatura energetica per questi prodotti.

Dalle prove effettuate in camera climatica (secondo la prEN 50440) i parametri energetici analizzati per questo studio sono:

- La dispersione termica  $Q_{pr}$  con termostatazione a 65°C, parametro fondamentale ed obbligatorio nella classificazione energetica;
- Il volume di acqua utile prelevabile a 40°C  $V_{40}$ , richiesto per le soglie di minimo rendimento.

Per poter effettuare una classificazione realistica degli apparecchi, verranno prese in considerazione quattro norme o proposte di norme che potrebbero essere utilizzate come riferimento per un futuro labeling energetico:

1. La proposta di etichettatura del SAVE 2000;
2. Il progetto di norma prEN 15332 riguardante la valutazione energetica dei boilers; [6]
3. Il capitolato francese “Cahier des charge de la marque, NF électricité performance N° LCIE 103-14 / C”;
4. La norma tedesca “DIN 44532 Elektro-wassererwarmer”.

Nella tabella 3 viene specificata la possibilità di passare ad una classe a maggior efficienza con la tipologia di apparecchio considerata. Come è possibile notare questo passaggio è possibile solo grazie all’ottimizzazione dello strato isolante.

Tabella 3 : Passaggio di classe di efficienza.

Modello	SAVE 2000	prEN 15332	C.D.C.	DIN 44532
<i>STD</i>	-	-	-	-
<b>HE</b>	NO	NO	NO	NO
<b>Si</b>	SI	SI	SI	SI
<b>HE + Si</b>	SI	SI	SI	SI

## CONCLUSIONI

Attualmente il percorso normativo europeo sugli scaldacqua elettrici ad accumulo è basato su parametri di funzionamento non corrispondenti al reale uso di questi apparecchi. Sfolgiando le pagine di questo trattato si nota che le direttive di riferimento per una presumibile etichettatura considerano il consumo energetico calcolato seguendo una termostatazione a 65°C, la stessa temperatura è imposta dal progetto di Norma Europea prEN 50440.

Le domande da porsi sono:

1. “Fissando la termostatazione a 65°C si può risparmiare energia apportando delle modifiche con le attuali tecnologie?”;
2. “Potendo svincolare la termostatazione dai 65°C si può risparmiare di più mantenendo le stesse performance?”.

La risposta alla prima domanda è “sì”, si può risparmiare energia fissando a 65°C la termostatazione, ma questo risparmio può ottenersi solamente aumentando notevolmente lo spessore del materiale isolante e l’unica tipologia adeguata al caso è il superisolato (Si) che porta a piccoli miglioramenti dell’efficienza senza però migliorare le performance dello scaldacqua ( $E(V_{40})/E_{\max\_H2O}$ ).

Allora cosa fare per risparmiare di più e, indirettamente, inquinare meno? La risposta a questo quesito è la medesima della seconda domanda: svincolando la termostatazione dai 65°C si può risparmiare molto di più.

Quello che il consumatore vuole dal proprio scaldacqua è la possibilità di avere la quantità di acqua calda ( $V_{40}$ ) desiderata e al contempo risparmiare energia. Esistono diversi modi per ottenere il  $V_{40}$  desiderato senza alleggerire il portafoglio, ma questo obiettivo si può raggiungere senza fissare la temperatura di termostatazione.

Attraverso l’ottimizzazione della resistenza elettrica e del deflettore si può abbassare la temperatura a regime ottenendo dei benefici in termini di efficienza; combinando inoltre l’aumento dello strato isolante si raggiungono miglioramenti ancora più elevati. Ma il maggiore risparmio si avrebbe attraverso una termostatazione elettronica dello scaldacqua. Utilizzando questi apparecchi secondo modelli di uso

razionali, che seguono le reali esigenze del consumatore, risparmiare energia diventa davvero possibile.

Purtroppo, per poter trasmettere al consumatore le informazioni necessarie all’utilizzo dei propri elettrodomestici, è necessario un intervento normativo: questo può essere in parte apportato tramite l’etichettatura degli apparecchi, che indirizzano il cliente sul prodotto più efficiente. Per gli scaldacqua elettrici ad accumulo le attuali proposte di labeling non forniscono un aiuto concreto. Per questo gruppo di prodotti il consumo energetico deve essere studiato non solo sulla base della dispersione termica  $Q_{pr}$ , ma anche considerando lo scopo per cui sono stati progettati, cioè la produzione di acqua calda complessiva.

## BIBLIOGRAFIA

1. Libro verde “Una strategia europea per un’energia sostenibile, competitiva e sicura”. Commissione della Comunità Europea. Bruxelles, 8.3.2006. COM(2006) 105 definitivo.
2. Terzoni, P. “Efficienza energetica degli scaldacqua elettrici ad accumulo per uso domestico: progetto di norma europea prEN 50440, metodi di prova e analisi dei risultati ottenuti nel laboratorio prove MTS Group”, Tesi di laurea in Ingegneria, Università di Perugia A.A. 2006-2007
3. Direttiva EUP 2005/32/CE “energy using products”, Gazzetta Ufficiale della Comunità Europea, 22 Luglio 2005
4. Norma Europea CEI EN 60379 “Methods for measuring the performance of electric storage water-heaters for household purpose”
5. Progetto di Norma Europea prEN 50440 “Efficiency of domestic electrical storage water heaters”
6. Progetto di norma Europea prEN 15332 - Heating boilers, Energetic assessment of hot water storage tanks

## ANALISI TERMODINAMICA E SIMULAZIONE DI UN IMPIANTO A CICLO COMBINATO CON SEQUESTRO DELLA CO<sub>2</sub>

Stefano Bracco, Angela Trucco

Università degli Studi di Genova, Facoltà di Ingegneria  
DIMSET – Dipartimento di Macchine, Sistemi Energetici e Trasporti  
Via Montallegro 1, 16145 Genova  
Tel: 019-21945123, Fax: 019-21945104, E-mail: stefano.bracco@unige.it

### SOMMARIO

Il problema dell'effetto serra è un argomento di interesse mondiale e molti Paesi stanno prendendo provvedimenti al fine di contenerne le conseguenze negative sul clima. Tra i principali gas responsabili dell'effetto serra, l'anidride carbonica riveste un ruolo fondamentale, in quanto prodotta da numerose attività sia naturali che antropogeniche. Per contenere l'impatto in atmosfera delle emissioni di CO<sub>2</sub>, in ambito industriale sono state progettate tecnologie innovative, indicate con la sigla CCS (Carbon dioxide Capture and Sequestration), che consistono nella cattura della CO<sub>2</sub> e nel suo trasporto in un luogo di stoccaggio idoneo.

Il presente articolo, dopo una rapida panoramica sulle principali tecnologie CCS, analizza un impianto di conversione energetica con sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta. Si tratta di un impianto combinato gas-vapore per la produzione di energia elettrica caratterizzato da un turbogas a circuito semichiuso con CO<sub>2</sub> come fluido di lavoro e combustione con ossigeno, anziché aria. Lo studio è stato sviluppato in due fasi: inizialmente è stata fatta un'analisi termodinamica parametrica del ciclo e successivamente è stato implementato un modello di simulazione del comportamento dell'impianto al fine di individuare le condizioni ottimali di progetto. L'articolo descrive sia il modello termodinamico che il simulatore e riporta i risultati più significativi dell'analisi effettuata.

### INTRODUZIONE

I cambiamenti climatici sono oggi fra le più emergenti tematiche ambientali che la comunità internazionale deve affrontare. In tale contesto emerge il crescente problema dell'effetto serra che ha portato alla necessità di ratificare, nel Febbraio del 2005, il Protocollo di Kyoto, importante strumento normativo internazionale atto a contrastare questo fenomeno globale. Il Protocollo di Kyoto, definito in base ai principi sanciti dalla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), stabilisce impegni legalmente vincolanti per la riduzione in atmosfera dei gas ad effetto serra e, nello specifico, impone ai Paesi industrializzati e con economie in transizione (riportati nell'Annesso I del Protocollo) di ridurre mediamente, durante il periodo 2008-2012, il livello delle emissioni dei gas serra del 5.2% rispetto ai livelli del 1990. In particolare, l'impegno della UE prevede la riduzione delle proprie emissioni dell'8%, mentre per l'Italia il target di riduzione è fissato al 6.5% entro il 2012, così come riportato dal Burden Sharing Agreement che stabilisce gli specifici obiettivi di emissione di ogni Stato. Una recente comunicazione della Commissione Europea, la COM(2007)2 del 10/01/2007, ha proposto per l'Europa una riduzione delle emissioni, rispetto ai livelli del 1990, del 30% entro il 2020 e del 50% entro il 2050.

È importante ricordare che, a seguito del Protocollo di Kyoto, sono stati introdotti anche i seguenti "meccanismi flessibili": Joint Implementation (accordi bilaterali o multilaterali tra paesi sviluppati finalizzati a specifici progetti, le cui emissioni evitate sono suddivise tra i paesi coinvolti), Clean Development Mechanism (progetti finanziati da un paese sviluppato in un paese in via di sviluppo) ed Emission Trading (scambio internazionale di quote di emissioni) [1].

In tale contesto un ruolo importante riveste la Direttiva

Europea 2003/87/CE sul mercato delle emissioni, che ha istituito un sistema comunitario per lo scambio di quote di emissioni di gas denominato Emission Trading System (ETS), al fine di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>; tale sistema prevede transazioni commerciali fra chi realizza contenimenti nelle emissioni superiori agli obiettivi assegnatigli e chi invece risulta deficitario. I principali settori interessati dalle Direttiva ETS sono: attività nel settore energetico (impianti di combustione con capacità termica superiore a 20 MW esclusi gli impianti di incenerimento rifiuti, raffinerie di petrolio, cokerie, ...), processi di produzione e trasformazione di materiali ferrosi, industrie dei prodotti minerali (cementifici, vetrerie, ...), e della carta. Senza entrare nel dettaglio dei meccanismi che stanno alla base dell'ETS, è opportuno ricordare che viene fissato un tetto alle emissioni totali di CO<sub>2</sub> di tutti i partecipanti, attraverso l'allocazione delle quote di emissione per un determinato ammontare in uno specifico periodo di tempo, e ogni anno i partecipanti devono restituire all'autorità competente un numero di quote corrispondenti alle emissioni reali prodotte. Il deficit, ovvero la differenza negativa tra le quote assegnate ad inizio anno e le quote da restituire a fine anno in base alle emissioni realizzate, deve essere coperto con l'acquisto di quote di emissione dal mercato, mentre le quote in esubero possono essere vendute o accantonate per gli anni successivi [1].

### 1. L'EFFETTO SERRA

#### 1.1 Descrizione del Fenomeno

Come noto, esiste un effetto serra naturale senza il quale non ci sarebbe vita sulla Terra: infatti, se la terra fosse priva di atmosfera, la sua temperatura superficiale sarebbe intorno a –

18°C. In realtà, la temperatura superficiale media si attesta intorno a +15 °C a causa della presenza di un'atmosfera composta da gas e nuvole la quale consente di intrappolare il calore così come avviene in una serra. Infatti, parte dell'energia irradiata dalla superficie terrestre viene catturata dalle nubi, dal vapore acqueo, dall'ozono, dal metano, dall'anidride carbonica e da altri gas presenti nella troposfera e nella stratosfera.

Per spiegare meglio il fenomeno, è significativo riportare l'analisi proposta da Consonni et al. in [2] secondo i quali, considerando la radiazione solare di 342 W/m<sup>2</sup> pari a 100 unità, la superficie terrestre riceve 50 unità dal sole nello spettro visibile e 89 unità dall'atmosfera nell'infrarosso per un totale di 139 unità, mentre cede 110 unità per irraggiamento di onde lunghe e 29 unità come calore sensibile e latente sempre per un totale di 139 unità. Si comprende che la temperatura della superficie della terra è fondamentalmente determinata dalla radiazione di ritorno, di cui i principali responsabili sono proprio i "gas serra" costituenti l'atmosfera.

Il forte sviluppo delle attività umane (produzione agricola ed industriale, trasporti, consumi domestici, ...) ha portato in questo ultimo secolo ad un brusco incremento delle emissioni di gas serra in atmosfera e quindi ad un maggior quantità di radiazioni riflesse verso la superficie terrestre, anziché disperse nel cosmo, con il conseguente aumento della temperatura media superficiale terrestre.

Tra i principali "gas serra", come tali elencati dal Protocollo di Kyoto (l'anidride carbonica, il metano, il protossido di azoto, gli idrofluorocarburi, i perfluorocarburi e l'esfluoruro di zolfo) la CO<sub>2</sub> ed il CH<sub>4</sub> rappresentano quelli che maggiormente contribuiscono all'effetto serra in quanto, nonostante la loro capacità di catturare e reirraggiare infrarossi sia inferiore ad altri gas serra, sono presenti in elevate concentrazioni in atmosfera; inoltre, contribuiscono anche all'effetto serra il vapore acqueo, l'ozono e gli aerosol.

Alcuni studi [3] ritengono che l'anidride carbonica sia responsabile per il 60% circa dell'attuale riscaldamento globale da effetto serra e significativo è ricordare che la concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera ha subito un brusco incremento negli ultimi anni e oggi si attesta intorno a 380 ppm, come risulta da recenti misurazioni fatte presso le isole Hawaii [2]. La concentrazione in atmosfera dei gas ad effetto serra aumenterà nei prossimi anni e ciò implicherà un aumento sensibile della temperatura media superficiale, comportando una maggiore evaporazione dell'acqua presente sulla Terra e quindi un'atmosfera più calda e umida. Si potrebbe assistere ad un incremento delle precipitazioni, anche di forte intensità, in molte zone dell'emisfero Nord a latitudini medio-alte e ad un crescente rischio di siccità in alcune zone continentali a latitudini medie [2]. Altre conseguenze prevedibili sono un innalzamento del livello dei mari, l'intensificarsi di fenomeni quali i cicloni tropicali e la riduzione dell'escursione diurna delle temperature; alcuni studi meteorologici ipotizzano anche delle implicazioni sulle grandi circolazioni marine, pronosticando perfino un affievolimento della corrente del Golfo. Bisogna però precisare che è difficile fare delle previsioni esatte sull'evoluzione dei fenomeni climatici per i secoli a venire e tutto dipende anche da quali saranno le strategie politiche ed energetiche che verranno intraprese dai paesi che maggiormente contribuiscono all'effetto serra.

## 1.2 L'Anidride Carbonica

L'anidride carbonica si origina dalla combustione completa del carbonio in aria ed è un gas incolore, inodore, non

velenoso ed irrespirabile in grandi concentrazioni; a pressione atmosferica e a temperatura ambiente si trova allo stato gassoso e solidifica se portato alla temperatura di -79 °C.

La CO<sub>2</sub> è utilizzata negli estintori come refrigerante schiumogeno inibitore della combustione, nell'industria chimica e nella produzione di bevande gassate. Viene prodotta durante la combustione di sostanze carboniose e dal processo respiratorio degli organismi viventi; è utilizzata dalle piante verdi per il processo biologico della fotosintesi clorofilliana al fine di produrre zuccheri e ossigeno. La concentrazione della CO<sub>2</sub> in atmosfera è determinata dal cosiddetto "ciclo globale del carbonio" ed è importante ricordare che la CO<sub>2</sub> si discioglie in acqua originando ioni carbonato e bicarbonato che, in presenza di calcio, formano carbonati di calcio: in questo modo parte dell'anidride carbonica presente in atmosfera si deposita negli oceani, sia sotto forma di sedimenti che come costituente di scheletri di organismi marini [2].

L'EIA (Energy Information Administration) ha stimato che nel mondo le emissioni di CO<sub>2</sub>, conseguenti all'impiego e alla combustione di combustibili fossili, siano passate da 21.7 miliardi di tonnellate nel 1994 a 27.04 miliardi di tonnellate nel 2004, suddivise tra le diverse aree geografiche e per fonte fossile come mostrato in Tab.1 e Tab.2 [4].

Tab.1 Emissioni di CO<sub>2</sub> (Miliardi di tonnellate) nel 2004 per area geografica

North America	6.89
Central & South America	1.04
Europe	4.65
Eurasia	2.55
Middle East	1.32
Africa	0.98
Asia & Oceania	9.60
Totale	27.04

Tab.2 Emissioni di CO<sub>2</sub> (Miliardi di tonnellate) nel 2004 nel mondo, suddivise per fonte fossile

Gas Naturale	5.60
Carbone	10.59
Petrolio	10.85

I maggiori produttori di CO<sub>2</sub> sono stati, nel 2004, gli Stati Uniti, la Cina, la Russia, il Giappone e l'India; l'Italia è risultata, con 0.48 miliardi di tonnellate, il decimo maggior produttore ed, in Europa, è stata preceduta solo dalla Germania e dal Regno Unito [4].

## 2. I SISTEMI CCS

La cattura e lo stoccaggio dell'anidride carbonica (CCS – Carbon dioxide Capture and Storage) è un processo che consiste nella separazione della CO<sub>2</sub> dai fumi provenienti da lavorazioni industriali o dagli impianti di produzione di energia elettrica e il suo trasporto in un luogo di stoccaggio idoneo per una separazione a lungo termine dall'atmosfera; attualmente queste tecnologie sono prevalentemente ancora in fase di ricerca e sviluppo, tranne che per alcune applicazioni nei settori di estrazione del petrolio e del gas, e si pongono l'obiettivo di contribuire alla riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera, senza dover rinunciare all'impiego delle fonti fossili per scopi energetici.

## 2.1 Cattura della CO<sub>2</sub>

Lo scopo della fase di cattura della CO<sub>2</sub> è quello di produrre un flusso concentrato ad alta pressione che possa essere trasportato senza difficoltà ad un sito di stoccaggio. A seconda dell'applicazione si distinguono tre approcci principali di cattura [5]:

- *cattura post-combustione*: la CO<sub>2</sub> viene estratta dai gas di combustione tramite solventi;
- *cattura pre-combustione*: il combustibile primario è gassificato in un reattore con vapore e aria o ossigeno al fine di produrre un syngas composto principalmente da monossido di carbonio e idrogeno; il syngas subisce poi un processo di reforming in un secondo reattore da cui si ottengono idrogeno, che serve per produrre energia e/o calore, e anidride carbonica che viene sequestrata.
- *combustione con ossigeno*: si utilizza ossigeno anziché aria per la combustione, al fine di ottenere un gas combusto costituito da CO<sub>2</sub> ad alta concentrazione e vapore acqueo, quest'ultimo facilmente rimovibile dalla CO<sub>2</sub> attraverso un processo di raffreddamento e compressione del gas.

## 2.2 Trasporto e Stoccaggio della CO<sub>2</sub>

Allo stato attuale della tecnologia, le tubazioni sono il metodo più comune di trasporto della CO<sub>2</sub> la quale viene trasportata allo stato liquido ad una pressione superiore a 8 MPa per evitare regimi di flusso bifase e per aumentarne la densità. La CO<sub>2</sub> liquida può anche essere trasportata in navi (a pressione intorno a 0.7 MPa), su rotaia o su strada in cisterne coibentate a una temperatura di circa -20 °C e ad una pressione intorno a 2 MPa. Alcuni studi indicano che il trasporto con tubazioni in mare risulta più oneroso dell'impiego di condotte sulla terraferma, mentre il trasporto su nave risulta più conveniente al crescere della distanza, tipicamente oltre 1 000 km [5].

Come noto, le principali metodologie di stoccaggio della CO<sub>2</sub> sono [5]:

- *stoccaggio geologico*: in campi petroliferi esauriti in cui l'iniezione di CO<sub>2</sub> comporta un'iper-produzione di petrolio (EOR – Enhanced Oil Recovery), in campi di estrazione di gas naturale dove una parte della CO<sub>2</sub> presente nel gas estratto viene re-iniettata insieme ad altra CO<sub>2</sub> industriale favorendo un incremento nella produzione di gas naturale (EGR – Enhanced Gas Recovery), in bacini a carbone non minabili dove l'iniezione di CO<sub>2</sub> comporta un rilascio del metano presente nel carbone (ECBM – Enhanced Coal Bed Methane) ed in acquiferi salini;
- *stoccaggio oceanico*: iniettando la CO<sub>2</sub> catturata direttamente in mare ad una profondità superiore a 1 000 m attraverso una tubazione fissa o una nave in movimento, oppure depositandola attraverso una tubazione fissa o una piattaforma al largo sul fondo dell'oceano, a profondità superiori a 3 000 m, dove la CO<sub>2</sub> ha una densità maggiore dell'acqua e quindi tende a stratificare sul fondo anziché dissolversi in atmosfera.
- *carbonatazione minerale*: fissazione della CO<sub>2</sub> tramite ossidi alcalini;
- *utilizzi industriali*: in processi chimici o biologici in cui la CO<sub>2</sub> è un reagente (ad esempio per la produzione di urea e metanolo, nel confezionamento di cibi, ...).

## 3. CASO DI STUDIO

### 3.1 Descrizione dell'Impianto

Il presente articolo descrive un'applicazione della combustione con ossigeno e, nello specifico, considera come caso di studio un impianto combinato gas-vapore caratterizzato dal fatto di avere un impianto turbogas a ciclo semichiuso con CO<sub>2</sub> come fluido di lavoro [3].

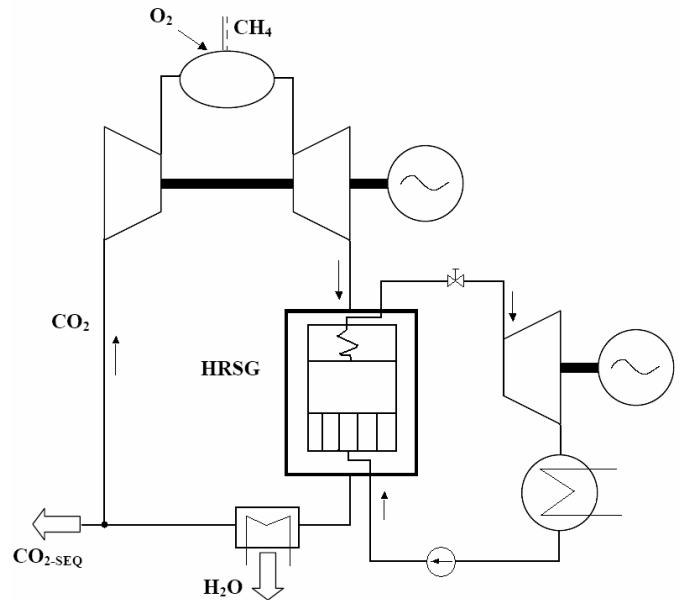


Fig.1 Schema semplificato dell'impianto combinato

Come si può vedere in Fig.1 il compressore aspira CO<sub>2</sub> ed il combustibile (gas metano) e il comburente (ossigeno) entrano in camera di combustione dopo essere stati compressi alla pressione di scarico del compressore dell'anidride carbonica; i prodotti della reazione di combustione sono CO<sub>2</sub>, che si somma alla portata proveniente dal compressore (portata che, essendo un inerte, non reagisce in camera di combustione) e H<sub>2</sub>O sotto forma di vapore.

Successivamente i fumi di combustione espandono in turbina per poi cedere calore in una caldaia a recupero (HRSG) al fluido evolvente nell'impianto a vapore sottoposto. All'uscita dell'HRSG i fumi vengono ulteriormente raffreddati all'interno di uno scambiatore di calore a superficie al fine di far condensare, e quindi recuperare, l'acqua presente al loro interno.

Infine si ha il sequestro di una parte della CO<sub>2</sub> in modo che il circuito si possa richiudere: proprio perché la CO<sub>2</sub> è il fluido circolante nel turbogas, solo una piccola parte deve essere sequestrata e questa risulta essere pari alla portata di CO<sub>2</sub> prodotta dalla reazione di combustione. Ne consegue che le dimensioni dell'impianto di cattura sono ridotte, se paragonate a quelle richieste per processare tutti i gas esausti di un impianto a ciclo aperto, e quindi si riducono i costi di cattura e stoccaggio.

### 3.2 Il Modello Termodinamico

L'obiettivo principale dello studio è stato quello di effettuare un'analisi termodinamica del funzionamento dell'impianto, prendendo in esame in particolare il turbogas, al fine di determinare, a parità di temperatura massima raggiunta,

il valore del rapporto di compressione che massimizza il rendimento reale e la potenza utile dell'impianto. Si elencano in questo sottoparagrafo ed in appendice le principali ipotesi ed equazioni utilizzate nel modello.

Sono state fatte le seguenti assunzioni:

- Condizioni all'aspirazione:  $T_1 = 288 \text{ K}$ ,  $p_1 = 101320 \text{ Pa}$ ;
- Temperatura massima del ciclo a gas:  $T_3 = 1510 \text{ K}$ ;
- $\dot{m}_{O_2} = 1 \text{ kg/s}$ ;
- Combustibile utilizzato: metano;
- Combustione in condizioni stechiometriche:  $\alpha = \alpha_{st} = 3.99$ ;
- $\eta_c = 0.85$ ,  $\eta_f = 0.90$ ,  $\eta_{cc} = 0.99$ .

I fluidi evolventi nel sistema ( $CO_2$ ,  $O_2$  e  $CH_4$ ) sono stati considerati come gas perfetti con calori specifici, a pressione costante e a volume costante, dati dalle correlazioni riportate in appendice. Per il calcolo delle temperature di fine compressione reale è stato utilizzato un calcolo iterativo, dei calcoli specifici e del loro rapporto  $k$ , implementando un codice in Visual Basic® 6.0.

Essendo note sia la portata di ossigeno che quella di combustibile, poiché la combustione è stata considerata stechiometrica, la portata di  $CO_2$  entrante in camera di combustione è stata calcolata attraverso la seguente equazione di bilancio:

$$\dot{m}_{CO_2} H_{2\_CO_2} + \dot{m}_{O_2} H_{2\_O_2} + \dot{m}_{CH_4} (H_{2\_CH_4} + H_{inf} \eta_{cc}) = \dot{m}_{fumi} H_3 \quad (1)$$

La potenza reale del turbogas è stata valutata con l'Eq. (2):

$$P_{r\_TG} = P_{r\_turbina} - \sum_i P_{r\_compressore_i} \quad (2)$$

e quindi si è potuto valutare il rendimento reale del turbogas:

$$\eta_{r\_TG} = \frac{P_{r\_TG}}{\dot{m}_{CH_4} H_{inf} \eta_{cc}} \quad (3)$$

L'impianto a vapore è stato supposto a tre livelli di pressione con un rendimento reale intorno al 40% ed una temperatura di uscita dei fumi dalla caldaia a recupero di  $110 \text{ °C}$ . Successivamente è stato dimensionato lo scambiatore che consente di raffreddare i fumi fino a  $15 \text{ °C}$  in modo da chiudere il ciclo a gas e recuperare, allo stato di liquido saturo, il vapore presente al loro interno.

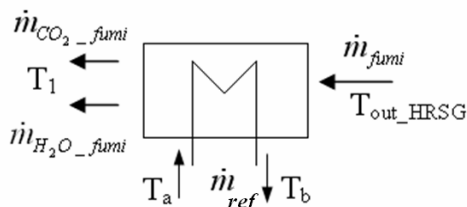


Fig. 2 Raffreddamento dei fumi in uscita dall'HRSG

La portata di acqua di raffreddamento necessaria per realizzare tale scambio termico è stata calcolata attraverso l'equazione di bilancio Eq. (4) che fa riferimento allo schema di Fig. 2.

$$\dot{m}_{H_2O\_fumi} (H_{V_o} - H_{L_4}) + \dot{m}_{CO_2\_fumi} (c_{pCO_2}(T_o) \cdot T_o - c_{pCO_2}(T_1) \cdot T_1) + \dot{m}_{ref} c_{pL} (T_b - T_a) = 0 \quad (4)$$

### 3.3 Il Modello di Simulazione

Il modello termodinamico del turbogas, precedentemente descritto, è stato implementato in un foglio elettronico di calcolo e si è costruito un programma iterativo in Visual Basic® per il calcolo delle temperature di fine compressione (per i compressori di  $CO_2$ ,  $O_2$  e  $CH_4$ ) e di fine espansione. I risultati ottenuti sono stati validati attraverso la costruzione di un modello di simulazione dell'intero impianto combinato utilizzando il software Thermoptim®, sviluppato dal Prof. R. Gicquel dell'Ecole des Mines di Parigi al fine di modellizzare e simulare, in condizioni nominali e di off-design, impianti energetici complessi.

### 3.4 Risultati della Simulazione

Per individuare le condizioni ottimali di progetto, la prima analisi dell'impianto turbogas ha riguardato lo studio dell'andamento del rendimento reale e della potenza reale in funzione del rapporto di compressione. Il rendimento e la potenza presentano un massimo e si annullano per valori di  $\beta$  estremamente elevati e ciò è da imputarsi alla natura stessa del fluido di lavoro, gas triatomico con  $k$  (rapporto tra i calori specifici) intorno a 1.2, ben diverso dal valore medio 1.4 proprio dell'aria [6].

Dato il risultato non previsto, si è ritenuta interessante un'indagine del tutto teorica, sul comportamento di altri gas nell'impianto in studio e si è pensato di prendere in considerazione, oltre all'aria, il gas argon per un confronto delle prestazioni a parità di quantità di combustibile bruciato. I risultati dell'analisi comparativa sono presentati in Figg. 3 e 4.

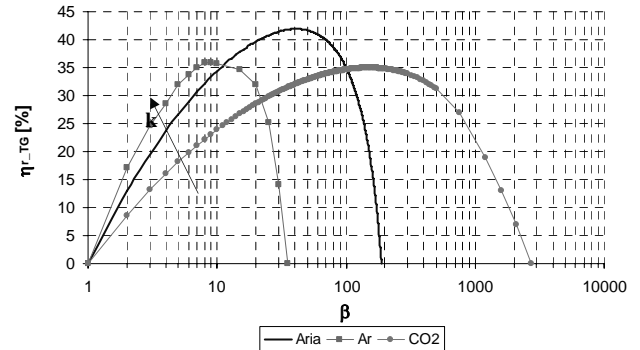


Fig.3 Il rendimento reale del turbogas per diversi fluidi di lavoro

Al fine di effettuare il confronto, è stato simulato il funzionamento del turbogas convenzionale, con fluido di lavoro aria: potenza reale e rendimento reale sono risultati massimi rispettivamente per  $\beta = 14$  e  $\beta = 41$  e si annullano per  $\beta = 188$ .

Simulando invece il turbogas aspirante argon, gas monoatomico con  $k$  medio intorno a 1.7, i massimi di rendimento e potenza reali sono stati registrati per  $\beta = 8$  e  $\beta = 9$  mentre gli stessi si annullano per  $\beta = 35$ .

Ritornando all'analisi dell'impianto a  $CO_2$ , i valori delle temperature di fine compressione reale, per i tre compressori presi in esame (per  $O_2$ ,  $CO_2$  e  $CH_4$ ), al variare del rapporto di compressione sono riportati in Fig. 5: la temperatura di fine compressione, a parità di condizioni (temperatura di aspirazione,  $\beta$ ,  $\eta_c$ ), risulta superiore per il gas caratterizzato dal  $k$  maggiore.

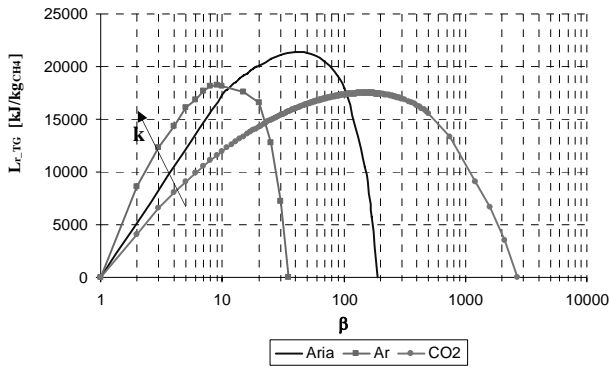


Fig. 4 Il lavoro reale del turbogas per diversi fluidi di lavoro

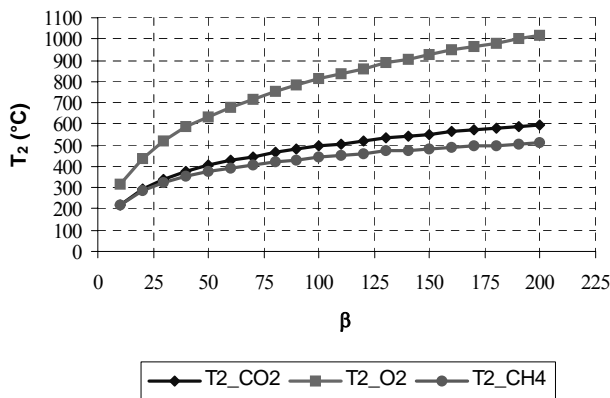


Fig. 5 Temperature di fine compressione reale

A differenza di quanto detto per le temperature di fine compressione, i lavori di compressione unitari (ottenuti dividendo la potenza reale di ogni compressore per la portata di gas elaborata dallo stesso) crescono al crescere di  $\beta$  e, a parità di  $\beta$ , si evidenziano valori crescenti al diminuire della massa molare del gas considerato, come riportato in Fig. 6.

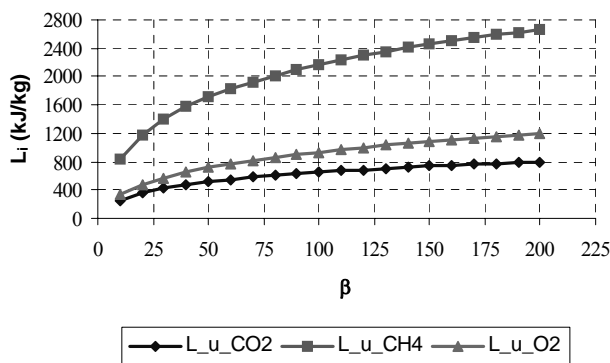


Fig. 6 Lavori unitari di compressione

La Fig. 7 mostra come la temperatura  $T_4$  di fine espansione decresca al crescere di  $\beta$ .

Si è valutato altresì l'andamento della portata dei fumi, al variare del rapporto di compressione  $\beta$ , mantenendo costanti le portate di ossigeno e metano e facendo variare la portata di  $\text{CO}_2$  in ingresso al compressore, in modo da mantenere costante la temperatura massima del ciclo: la Fig. 8 riporta, in funzione di  $\beta$ , la portata di fumi suddividendola nelle due componenti  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  allo stato di vapore.

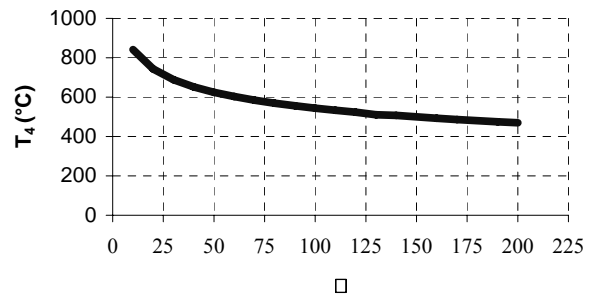


Fig. 7 Temperatura di fine espansione dell'impianto a  $\text{CO}_2$

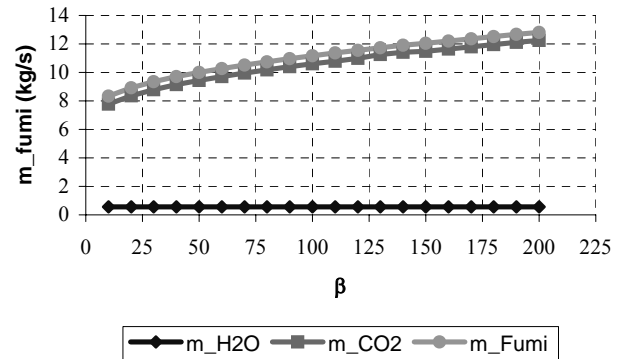


Fig. 8 Andamento portate all'uscita del turbogas

In base all'analisi termodinamica effettuata, la scelta del rapporto di compressione dell'impianto turbogas a  $\text{CO}_2$ , impianto "topping" dell'impianto combinato, dovrebbe ricadere sul valore di massimo lavoro, che risulta anche molto prossimo al valore di massimo rendimento, ossia  $\beta \approx 152$ .

Tuttavia dalla Fig. 7 si evince che per tale valore di  $\beta$  la temperatura di fine espansione  $T_4$  risulta troppo bassa per il progetto di un impianto combinato di grande potenza. Per ottenere una temperatura di fine espansione superiore ai  $590^\circ\text{C}$  e quindi poter procedere al progetto di un impianto a vapore a tre livelli di pressione, la scelta del rapporto di compressione cade per valori prossimi a  $\beta = 60$ . Tale scelta non penalizza eccessivamente rendimento e lavoro, essendo le curve di  $\eta_r$  e  $L_r$  pianeggianti attorno al valore massimo. Il rendimento dell'impianto a vapore si può quindi ritenere prossimo al 40%. Il rendimento previsto per l'impianto combinato risulterà quindi prossimo al 57%, valore del tutto in linea con i valori dei più recenti impianti combinati tradizionali.

## CONCLUSIONI

È stato analizzato un impianto combinato con turbogas a  $\text{CO}_2$  e sono state individuate le condizioni di progetto per un impianto ad alte prestazioni combinato gas-vapore con sequestro di  $\text{CO}_2$ . Non è stata presa in considerazione l'energia assorbita dall'impianto di liquefazione della  $\text{CO}_2$  ai fini di procedere alla fase di stoccaggio della stessa ed al suo trasporto.

Il rapporto di compressione ottimo dell'impianto è risultato pari a 60, valore elevato che richiede l'installazione di due compressori in serie e quindi un impianto a gas su due alberi, con generatore di gas caldi e turbina libera.

## APPENDICE

Per calcolare i calori specifici a pressione costante di ossigeno, anidride carbonica e vapore sono state utilizzate le correlazioni proposte da Gicquel in [7]:

$$c_{p_{O_2}} = \frac{1}{M_{O_2}} \left( 48.212 - \frac{536.8}{\sqrt{T}} + \frac{3559}{T} \right) \quad (5)$$

$$c_{p_{CO_2}} = \frac{1}{M_{CO_2}} \left( 67.83 - \frac{15189}{T} + \frac{1.82 \cdot 10^6}{T^2} \right) \quad (6)$$

$$c_{p_{H_2O}} = \frac{1}{M_{H_2O}} \left( 83.15 - \frac{1863}{\sqrt{T}} + \frac{17445}{T} \right) \quad (7)$$

Il calore specifico a pressione costante del metano è stato calcolato con l'Eq. (8).

$$c_{p_{CH_4}} = \frac{4.186}{M_{CH_4}} (4.598 + 1.245 \cdot 10^{-2} T + 2.860 \cdot 10^{-6} T^2) \quad (8)$$

Le temperature di fine compressione reale sono state calcolate per O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> con l'Eq. (9):

$$T_{2-i} = \frac{T_{2s-i} - T_1}{\eta_{c-i}} + T_1 = \frac{\left( \beta^{\frac{k_i-1}{k_i}} - 1 \right) \cdot T_1}{\eta_{c-i}} + T_1 \quad (9)$$

con:

$$k_i = \frac{c_{p-i}}{c_{v-i}} = \frac{c_{p-i}}{c_{p-i} - R_i} \quad (10)$$

Nel bilancio in camera di combustione le entalpie sono state calcolate secondo le seguenti equazioni:

$$H_{2-i} = c_{p-i}(T_{2-i}) \cdot (T_{2-i} - T_{rif}) \quad (11)$$

$$H_3 = c_{p-fumi}(T_3) \cdot (T_3 - T_{rif}) \quad (12)$$

$$c_{p-fumi} = \frac{\dot{m}_{CO_2-fumi} \cdot c_{p_{CO_2}}(T_3) + \dot{m}_{H_2O-fumi} \cdot c_{p_{H_2O}}(T_3)}{\dot{m}_{CO_2-fumi} + \dot{m}_{H_2O-fumi}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{fumi} &= \dot{m}_{CO_2-fumi} + \dot{m}_{H_2O-fumi} = \\ &= \left( \dot{m}_{CO_2} + \left( \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} \right) \cdot M_{CO_2} \right) + \left( \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} \right) \cdot 2M_{H_2O} \end{aligned} \quad (14)$$

## NOMENCLATURA

Simbolo	Descrizione [Unità di misura]
$c_p$	calore specifico a pressione costante [kJ/kg K]
$c_v$	calore specifico a volume costante [kJ/kg K]
H	entalpia specifica [kJ/kg K]
$H_{inf}$	potere calorifico inferiore [kJ/kg]
k	rapporto tra i calori specifici
L	lavoro unitario [kJ/kg]

M	massa molare [g/mol]
$\dot{m}$	portata [kg/s]
p	pressione [Pa]
P	potenza [kW]
R	costante del gas [kJ/kg K]
T	temperatura [K]

Simboli greci	Descrizione [Unità di misura]
$\alpha$	rapporto ossigeno-combustibile
$\beta$	rapporto di compressione
$\eta$	rendimento

Pedici	Descrizione
1	condizioni di p=101 320 Pa e T=15°C
2	uscita compressore
3	uscita camera di combustione
4	uscita turbina a gas
c	compressore
cc	camera di combustione
i	indice del componente i-esimo
L	liquido
O	uscita HRSG
r	reale
ref	refrigerante
rif	condizioni di p=101 320 Pa e T=25°C
s	isoentropico
st	condizioni stechiometriche
t	turbina
v	vapore

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Gestore Mercato Elettrico, I Mercati per l'Ambiente del GME, report GME, pp. 11-15, Roma, 2006.
2. E. Macchi, Cicli Combinati a Gas Naturale, cap.2, polipress, Milano, 2005.
3. A.J.B. Jackson, H. Audus and R. Singh, Gas Turbine Engine Configurations for Power Generation Cycles having CO<sub>2</sub> Sequestration, Power and Energy Journal, Vol. 218 Part A, pp. 1-13, ImechE, 2004.
4. Energy Information Administration (EIA), International Energy Annual Report, 2004.
5. Working Group III of IPCC, Carbon Dioxide Capture and Storage, IPCC Special Report, 2005.
6. G. Lozza, Turbine a Gas e Cicli Combinati, cap. 1, Editore Esculapio, Bologna, 1996.
7. R. Gicquel, Systèmes énergétiques, Tome 1, cap. 2, Ecole des Mines de Paris, Paris, 2001.

## SVILUPPO DELL'UTILIZZO DI TECNICHE OTTICHE PER IL MONITORAGGIO DI FENOMENI TERMOACUSTICI NELLE TURBINE A GAS

Rosanna Ninni<sup>1</sup>, Antonio Ferrante<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRIS, Consorzio Ricerche Innovative per il Sud, Gioia del Colle, rosanna.ninni@ansaldoboiler.it

<sup>2</sup>CCA srl, Centro Combustione Ambiente., Gioia del Colle, antonio.ferrante@ansaldoboiler.it

### SOMMARIO

Viene descritto un sistema per il monitoraggio di fluttuazione di intensità luminosa emessa da fiamme, adatto ad essere installato su combustori di turbine a gas; il dispositivo non intrusivo è stato progettato come strumento di rilevazione del fenomeno dell' *humming* per fornire informazioni sulle modalità di rilascio di calore. Tramite esso è possibile indagare sulla interazione fra la acustica del combustore e la dinamica di combustione. La catena strumentale ottica è stata realizzata per raccogliere la radiazione generata dai fenomeni di chemiluminescenza dei radicali di reazione. I risultati delle osservazioni vengono raccolti da un sistema di acquisizione dati sviluppato appositamente ed un opportuno software, MRA, è stato scritto come strumento per la prognostica del complesso fenomeno delle oscillazioni termoacustiche.

### INTRODUZIONE

Il rilascio di calore in regioni confinate può dare origine all' instaurarsi di oscillazioni di pressione all' interno dello spazio in cui il calore viene ceduto [1]: tali vibrazioni sono dette oscillazioni termoacustiche. Il contenuto spettrale delle oscillazioni di pressione è caratterizzato da ben determinate frequenze, per cui in prossimità del fenomeno si possono ascoltare chiari "suoni" a bassa frequenza e tali suoni vengono denominati *humming*, mutuando questo termine dalla Elettronica che descrive il fenomeno del suono emesso dagli amplificatori audio in assenza di segnali in ingresso, e provenienti dalla tensione di alimentazione di rete.

La origine dei fenomeni termoacustici fu descritta euristicamente da J. W. S. Rayleigh nel 1878, [2], in termini di reazione positiva fra la acustica del volume in cui viene rilasciato il calore e la modalità in cui il calore viene scambiato nel volume stesso: l'effetto di questo anello di reazione, Figura 1, dipende dalla fase con cui il calore viene rilasciato.

Questa descrizione euristica del fenomeno dell' *humming* fu dedotta analiticamente qualche anno dopo, si veda ad esempio [3], fornendo la condizione necessaria per la insorgenza delle oscillazioni termoacustiche per mezzo della disequazione di Rayleigh, Eq.(1):

$$\int_0^{\tau} \int_V p'(x,t)q'(x,t)dvdt > \int_0^{\tau} \int_V \Phi(x,t)dvdt \quad (1)$$

dove  $p'$  e  $q'$  sono le variazioni di pressione e rilascio di calore nel volume  $V$ ,  $\tau$  è il periodo di oscillazione e  $\Phi$  è la dissipazione dell'onda acustica all'interno di  $V$ .

Per avere oscillazioni termoacustiche nel volume  $V$  è necessario che la disequazione precedente sia soddisfatta.

### OSCILLAZIONI TERMOACUSTICHE NELLE TURBINE A GAS

Le moderne turbine a gas *heavy duty* sono dotate di compatte camere di combustione, in genere annulari o cannulari, in cui calore viene fornito al fluido facendo reagire miscele magre di aria e combustibile per mantenere le temperature dei fumi compatibili con le temperature di esercizio della prima fila di palette della turbina. Inoltre, per ridurre le emissioni di ossidi di azoto di origine termica, anche localmente le temperature vengono mantenute uniformi premiscelando i reagenti prima che le reazioni esotermiche avvengano. Poiché dunque il calore viene rilasciato in volumi confinati, i combustori delle turbine a gas possono essere sede di oscillazioni termoacustiche.

In dettaglio le turbine a gas di ultima generazione sono

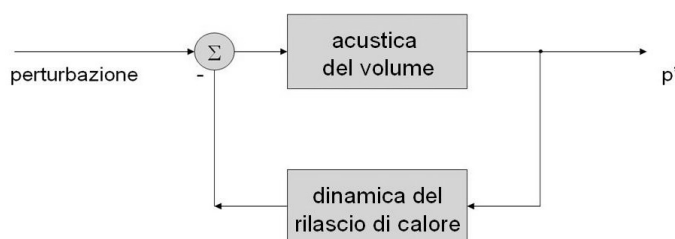


Figura 1. Anello di reazione

particolarmente sensibili a innescare instabilità termoacustiche per i seguenti motivi:

- Operano in prossimità del limite magro di estinzione *Lean Blow Out*, LBO;
- Ridotto smorzamento di energia acustica,  $\Phi$  in Eq. 1, a causa della ridotta portata di aria di raffreddamento del tubo di fiamma;
- Elevate velocità del combustibile per evitare fenomeni di *flash back*, e quindi massime pressioni nella zona di reazione;
- Elevate densità di energia e quindi di rilascio termico in prossimità del massimo della pressione.

La prossimità del punto di lavoro al limite di stabilità è causa di perturbazioni per il sistema, ma la stessa natura turbolenta del fenomeno combustivo è generosa sorgente di perturbazione.

In effetti quello delle oscillazioni termoacustiche rappresenta uno dei problemi più seri per il funzionamento delle moderne turbine a gas *dry low NO<sub>x</sub>*: severe vibrazioni nel combustore, Figura 2, possono essere causa di danni meccanici alla struttura della macchina, nel peggiore delle ipotesi, ma anche limitare il raggiungimento del carico base della turbina a gas.

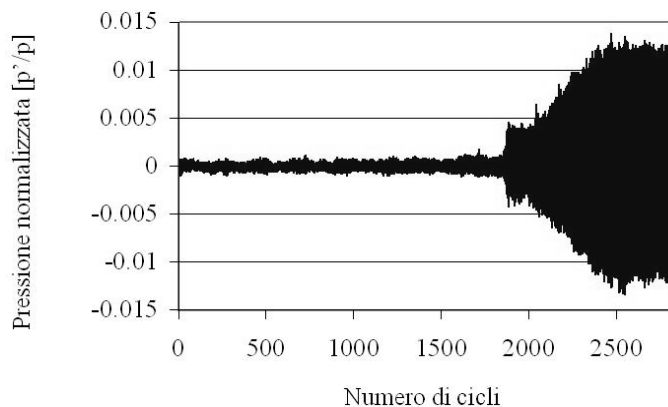


Figura 2 Rilevazione di humming in turbina a gas

La soluzione ideale sarebbe quella di costruire combustori di turbine a gas intrinsecamente stabili: al raggiungimento di tale obiettivo la descrizione analitica di Rayleigh del fenomeno non fornisce alcuna possibilità di previsione, dal momento che la soddisfazione della disequazione è condizione necessaria ma non sufficiente per la instabilità del sistema. Inoltre il problema dell' humming è spesso presente in impianti in fase di *commissioning* o anche in macchine durante il normale esercizio, pertanto è importante prevedere l'evenienza delle oscillazioni per poter intervenire in tempi "ragionevoli" e riportare la macchina in regione di stabilità evitando importanti problemi all'impianto stesso, agendo, per esempio sulla stechiometria di combustione o sul frazionamento del combustibile.

## FENOMENOLOGIA DELLE OSCILLAZIONI TERMOACUSTICHE IN TURBOGAS

Quando in un combustore di turbina a gas, o in simulatori sperimentali, si innescano fenomeni termoacustici e si instaura

un regime di humming, si osservano variazioni di pressione a ben determinate frequenze, Figura 3.

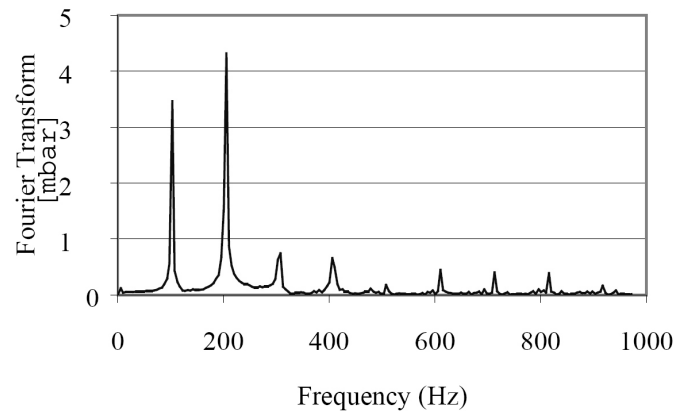


Figura 3 Spettro di humming in un simulatore di turbogas

Le frequenze che vengono rilevate durante i regimi di humming coincidono con alcune delle frequenze naturali del combustore e le loro armoniche; si nota che tali oscillazioni sono molto stabili e ripetibili in termini di frequenze, e la Figura 4 riporta la autocorrelazione del segnale di pressione nel combustore.

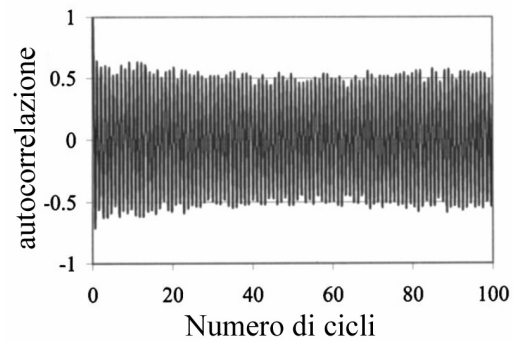


Figura 4 Autocorrelazione del segnale  $p'(t)$

Si nota come il valore di autocorrelazione si mantiene prossimo a uno su un numero elevato di cicli.

Nonostante la ripetibilità delle frequenze di humming, sperimentalmente si trova che le ampiezze del segnale, e le fasi di esso variano in maniera quasi casuale da ciclo a ciclo; inoltre i valori dei parametri a cui è possibile legare il regime di stabilità della macchina, come la stechiometria di combustione o il grado di *splitting* del combustibile variano da test a test, nell'ambito di una stessa macchina. Risulta pertanto impossibile fornire una descrizione puramente deterministica del fenomeno, trattandosi di eventi stocastici, e quindi meglio interpretati in un ambito statistico. Questo aspetto rende ancora più complicato il compito dell'operatore che gestisce la macchina, o del software di supervisione, in quando riesce particolarmente improbabile prevedere quanto "lontani" si è dal margine di instabilità della turbina a gas.

Rimanendo attualmente quella della analisi statistica l'unica via percorribile, occorre produrre una grossa mole di dati provenienti dal combustore per individuare le aree di stabilità al variare dei parametri di funzionamento dell'impianto.

Per il raggiungimento di tale obiettivo parziale occorrono

due classi di strumenti:

1. sistemi di diagnostica dedicati al fenomeno;
2. sistemi di acquisizione dati in grado di gestire segnali con caratteristiche temporali molto diverse.

## TECNICHE DI DIAGNOSTICA PER FENOMENI TERMOACUSTICI

L'interazione "termo-acustica" nel combustore di una turbina a gas produce fluttuazioni della pressione, la pressione dinamica, sul valore medio, e dunque la variazione di pressione, il suono, è una manifestazione della interazione *in fieri*. I fenomeni termoacustici vengono rivelati e misurati usando trasduttori di pressione dinamica: si tratta di cristalli piezoelettrici, minerali o sintetici, in grado di essere esposti a temperature elevate della camera di combustione. Una variazione di pressione su di una superficie produce una separazione di carica elettrica proporzionale alla variazione stessa; amplificando e condizionando questa variazione di carica si ottiene una affidabile misura della variazione di pressione. I trasduttori piezoelettrici sono strumenti robusti, ma hanno inconvenienti di diversa natura:

1. Al disopra della temperatura di Curie i cristalli perdono definitivamente le loro proprietà piezoelettriche;
2. Anche al disotto della temperatura di Curie, i materiali piezoelettrici tendono a depolarizzarsi nel tempo, fornendo valori più bassi di pressione dinamica.
3. Essi forniscono una misura dell'effetto e non della causa del fenomeno su cui si sta indagando.

Su quest'ultimo punto occorre chiarire che in effetti in fase di commissioning o di normale esercizio della turbina a gas il compito di tali trasduttori è proprio quello di misurare eventuali variazioni di pressione per agire in caso si superino limiti ben definiti, e non interessano altri tipi di informazione come una misura del fenomeno che ha originato il regime di instabilità. Inoltre in un anello di reazione non si ottengono importanti informazioni se si distinguono la causa e l'effetto, che tenderà a amplificare la causa stessa.

Una misura della variazione di rilascio di calore rappresenta tuttavia una indicazione più diretta del fenomeno termoacustico: una rilevazione di tal genere può essere realizzata sfruttando le caratteristiche radiative di alcuni intermedi di reazione. OH\*, CN\*, CH\* e C<sub>2</sub>\* emettono energia elettromagnetica per effetto chemiluminescenza nella regione del vicino ultravioletto, Tabella 1.

Specie	lunghezza d'onda [nm]
OH*	306 - 315
CN*	359 - 386
CH*	390 - 431
C <sub>2</sub> *	469 - 473, 510 - 516

Trattandosi di radicali, la loro esistenza indica di essere in presenza di zone reattive, e quindi in zone di rilascio di calore. Potendo considerare le molecole in stato elettronico eccitato come semplici oscillatori armonici quantizzati, la radiazione emessa è proporzionale alla densità di oscillatori e quindi alla

quantità di calore rilasciato. Una fluttuazione della intensità luminosa nella regione ultravioletta dello spettro è dunque misura della fluttuazione di rilascio di calore. Va sottolineato che una tale misura fornisce risultati relativi, dal momento che essa è legata a numerosi parametri difficilmente controllabili, come il fattore di raccolta ottica o la efficienza quantica del fenomeno di chemiluminescenza.

Un tipico sistema di rilevamento della fluttuazione di intensità luminosa è costituito da un insieme di ottiche per la raccolta della radiazione, un convertitore optoelettronico e la elettronica di condizionamento del segnale elettrico. Un tale *set up* sperimentale è tipico di un laboratorio di misura, ma mal si adatta ad essere installato su un impianto in esercizio: richiede accessi ottici, esposizione dei componenti ad elevate temperature, risulta poco rigido dal punto di vista meccanico.

In collaborazione con BFI Automation, Germania, è stato sviluppato un prototipo non intrusivo per la misura della fluttuazione di intensità luminosa idoneo ad essere installato e mantenuto in esercizio in turbine a gas *heavy duty*. Il prototipo, Figura 5, raccoglie la intensità luminosa sfruttando lo stesso accesso ottico del rivelatore di fiamma: uno speciale *bundle* a "Y" di fibre ottiche consente di dividere in due parti il segnale raccolto, inviandone una parte al sistema di rivelazione di fiamma, e collegato ai *loop* di sicurezza della macchina, l'altra parte di energia è a disposizione per analisi di fluttuazione di luminosità.

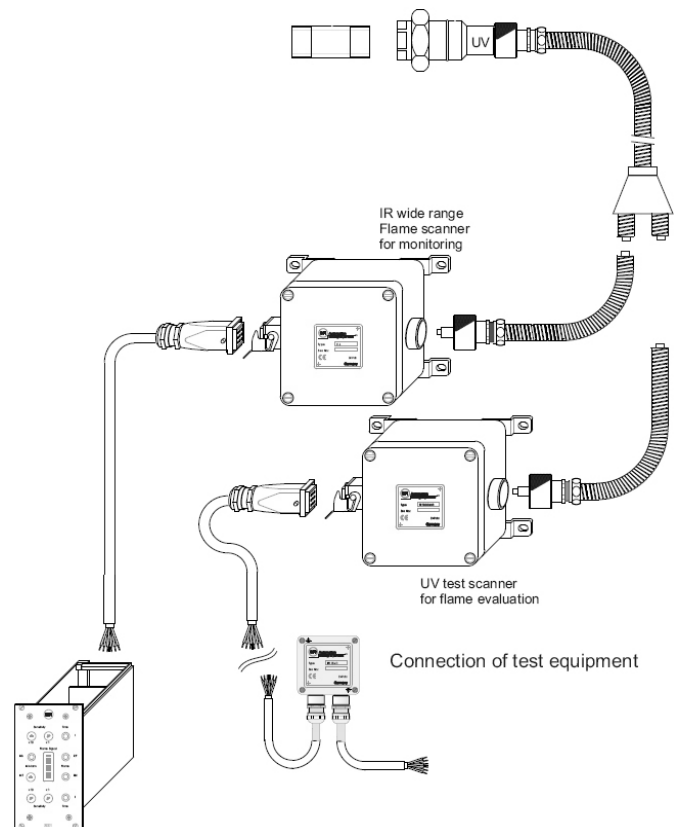


Figura 5. Schema a blocchi del sistema di diagnostica ottica

Le fibre ottiche del *bundle* hanno caratteristiche spettrali diverse: la parte di fibra per l'operazione di rivelamento fiamma ha una banda passante di 430-2400 nm, mentre la parte destinata alla rivelazione di radicali di reazione è più spostata nella zona ultravioletta dello spettro, 260-1200nm.

La radiazione UV viene focalizzata su un convertitore optoelettronico di GaP, che presenta buone caratteristiche di

conversione nella regione 300-500 nm, Figura 6; una catena di amplificatori operazionali converte la corrente fotoindotta in una tensione di  $\pm 5$  V, tramite una regolazione di guadagno variabile.

Per mezzo dell' utilizzo di fibre ottiche il sistema può essere esposto di continuo ad un ambiente di 200°C, poiché la parte elettronica è a distanza di sicurezza; la fibra ottica è lunga 3 m.

Il sistema prototipale sviluppato con BFI Automation risulta per nulla invasivo, dal momento che esso sfrutta lo stesso accesso ottico della rivelazione di fiamma, e si candida come strumento sofisticato di diagnostica del fenomeno termoacustico applicabile in continuo su macchine *heavy duty*.

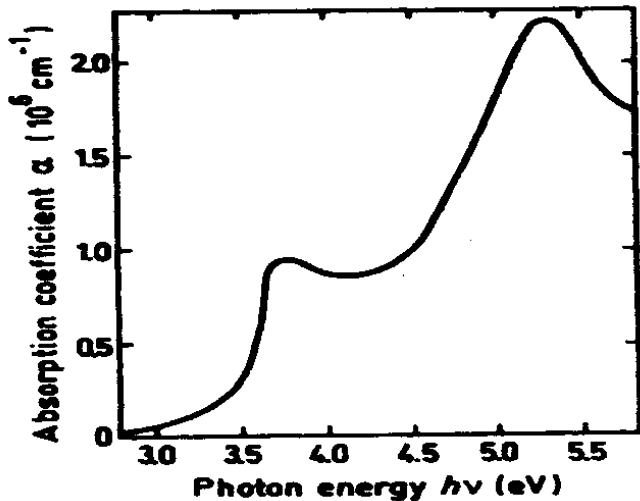


Figura 6 Coefficiente di assorbimento del GaP

## ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

L'obiettivo prefissato, di allestire un sistema prognostico specializzato nella previsione di fenomeni di instabilità termoacustica, non può essere perseguito se non prestando attenzione alla acquisizione e successiva analisi dei dati di impianto. In particolare è auspicabile l'utilizzo di un codice di acquisizione che sia pronto, flessibile, robusto ed affidabile. In un impianto reale sono, per fortuna, rari i momenti in cui si ha la possibilità di osservare fenomeni di instabilità termoacustica, e la gran parte di queste occasioni sono concentrate nel periodo di *commissioning* dell'impianto. Un sistema ideale deve pertanto essere pronto in qualsiasi situazione a registrare tutti i dati necessari all'analisi del fenomeno quando il software stesso rileva la presenza di situazioni anomale. In questo senso, la presenza di "grilletti" (*trigger*) impostabili dall'utente, che facciano scattare in automatico la memorizzazione dei dati è una necessità. In particolare è necessario che il sistema registri anche una certa quantità di dati relativi ad un intervallo di tempo che precede l'istante di *trigger*.

La flessibilità del sistema di acquisizione sta nel fatto che consente di impostare frequenze di acquisizione differenti per i singoli canali, ottimizzando pertanto sia la qualità dei risultati (massima frequenza di acquisizione compatibile con la catena di misura del canale specifico), sia l'occupazione di memoria non volatile, evitando la memorizzazione di dati a frequenza superiore a quella garantita dalla catena di misura del singolo canale.

La robustezza del sistema è stata ricercata in fase di scrittura del codice prevedendo una moltitudine di eventi che in situazioni del tutto anomale potrebbero condurre il programma a generare un errore non reversibile e ad intrappolare tali eventi in modo che la singola funzionalità del programma ripristinarsi in maniera automatica dopo aver segnalato l'evento in un *log-file*. Per quanto concerne l'affidabilità, il sistema è stato provato sull'impianto per un periodo di tempo ancora troppo breve per potersi sentire garantiti, ma i primi riscontri lasciano ben sperare.

Il codice è stato sviluppato interamente in ambiente NI LabVIEW® poiché si è ritenuto questo ambiente un buon compromesso tra affidabilità, tempi di sviluppo richiesti, e strumenti messi a disposizione del programmatore.

Il codice consente il salvataggio in automatico di dati dinamici derivanti da trasduttori di pressione dinamica piezoelettrici, da accelerometri e dal fotodiode UV sperimentale della BFI. Tali dati sono sincronizzati con alcuni tra i principali dati di impianto, in modo che sia sempre possibile risalire alle condizioni generali di impianto quando si verifica un evento di instabilità termoacustica. Il *software* MRA permette anche il monitoraggio remoto dell'impianto e consentirebbe quindi di effettuare la supervisione di più sistemi da un unico centro di controllo.

L'elaborazione dei dati è attualmente affidata ad un secondo programma sviluppato in ambiente LabVIEW, che costituisce un modulo separato del software MRA, il quale si interfaccia con il primo, consentendo di effettuare una moltitudine di elaborazioni DSP sia matematiche che statistiche tese a rilevare i precursori più affidabili dell'*humming*. Il fenomeno può essere osservato attraverso la *Joint Time Frequency Analysis*, attraverso la rappresentazione delle traiettorie descritte dai segnali nello spazio delle fasi [4], oppure attraverso l'autocorrelazione del segnale dinamico filtrato in banda stretta sulle frequenze relative ai modi instabili come propongono alcuni autori per valutare il coefficiente di smorzamento (5).

## CONCLUSIONI

Si è descritto un sistema che attraverso l'utilizzo di sensori optoelettronici, che almeno limitatamente all'impiego a bordo macchina, sono da ritenersi innovativi, si candida a fornire interpretazioni delle dinamiche dei sistemi di combustione più precise ed affidabili rispetto ai sistemi tradizionali. L'analisi dei dati, acquisiti in maniera automatizzata attraverso un codice sviluppato appositamente, sarà tesa a valutare gli indicatori più opportuni ad effettuare la diagnosi di stato del sistema e la previsione di fenomeni instabilità se non in forma deterministica, almeno in forma probabilistica. Il fine ultimo della sperimentazione oggetto del presente lavoro è di fornire al sistema di controllo un indicatore dello stato del sistema, limitatamente al rischio di instabilità termoacustica, che sia funzione delle effettive condizioni di funzionamento della macchina e non già determinato per confronto con i limiti rilevati in fase di *commissioning* dell'impianto

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia BFI Automation, e in particolare Michael Mindermann per aver realizzato e concesso in sviluppo il prototipo di rivelatore ottico per rivelazione di fluttuazioni di intensità luminosa.

## NOMENCLATURA

simbolo	definizione	unità di misura SI
$\Phi$	energia	J
p	pressione	Pa
q	Quantità di calore	J
$\tau$	periodo	s
t	tempo	s

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. R.L. Raun, M.W. Beckstead, J. C. Finlinson and K.P. Brooks, A review of Rijke tubes, Rijke burners and related devices, *Prog. Energy Combustion Sci.*, vol. 19, pp. 313-364, 1993.
2. J. W. S. Rayleigh, *Nature* 18, pp. 319-321, 1878
3. J. P Hathout, Thermoacoustic Instability, *Fundamentals in Modeling and Combustion*, 2-280, A.F.Ghoniem, 1999.
4. T. C. Liewen, Statistical characteristics of oscillations in a premixed combustor, *J. of Sound and Vibration*, 260, 3-17, 2003.
5. T. C. Liewen, Online Combustor Stability Margin Assessment Using Dynamic Pressure Data, *Transaction of the ASME J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, **127** pp. 478-482, 2005



## VALUTAZIONI ENERGETICHE ED ECONOMICHE SULLE VARIE TECNOLOGIE DI STOCCAGGIO DELL'IDROGENO

S. Arca<sup>1</sup>, F. Cotana<sup>2</sup>, F. Rossi<sup>2</sup>, P. Di Profio<sup>1</sup>, R. Germani<sup>1</sup>, G. Savelli<sup>1</sup>, M. Amantini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEMIN, Centro di Eccellenza Materiali Innovativi Nanostrutturati, Dip. Chimica, Università di Perugia, Via Elce di Sotto, 8 - 06123 Perugia

<sup>2</sup>CIRIAF, Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Sezione di Fisica Tecnica, Via G. Duranti 67, 0125, Perugia

### SOMMARIO

Per limitare le conseguenze sull'ambiente derivanti dall'aumento di consumo di combustibili fossili, la comunità internazionale si è rivolta a nuove soluzioni tecnologiche quali Fuel Cells (FC) e Veicoli alimentati a Celle a Combustibile (FCV) che impiegano come combustibile l'idrogeno. Tra gli ostacoli più grandi che si frappongono alla diffusione di queste nuove tecnologie ci sono però quelli legati allo stoccaggio e al trasporto dell' $H_2$  stesso.

Attualmente esistono diverse modalità di immagazzinamento dell' $H_2$ . Ai sistemi più classici e più diffusi quali gas compresso e gas liquido, si affiancano nuove tecniche ancora in fase di studio o di ingegnerizzazione quali assorbimento chimico (idruri metallici, ammoniaca, idrocarburi) e fisico (nanotubi) dell'idrogeno. Infine, si sta sviluppando rapidamente una nuova tecnologia basata sui clatrati idrati di idrogeno. Obiettivo dello studio svolto è quello di valutare i parametri prestazionali dei diversi sistemi di stoccaggio al fine di determinare la migliore tecnologia disponibile e la migliore filiera tecnologica dalla produzione all'impiego finale dell' $H_2$ . Per ciascuna delle diverse soluzioni di stoccaggio, considerando un sistema costituito da  $H_2$ , vettore e recipiente, sono stati fissati i valori di densità energetica di  $H_2$  nel sistema (kWh/Kg e kWh/litro), % in massa di  $H_2$  nel sistema, densità del sistema (Kg/l), densità di  $H_2$  nel sistema e energia spesa (stoccaggio, trasporto e il ripristino fino a condizioni di impiego) su energia immagazzinata. Dallo studio svolto, si evidenzia che la tecnologia a idrati di idrogeno, pur essendo ancora da ottimizzare, è fortemente competitiva con gli approcci tradizionali.

### INTRODUZIONE

L'immagazzinamento dell'idrogeno costituisce uno dei principali problemi che ostacolano la diffusione di applicazioni basate su celle a combustibile e, più in generale, l'avvento della cosiddetta "Hydrogen Economy". Da una parte, i classici sistemi di compressione e liquefazione del gas forniscono un approccio relativamente efficiente e consolidato, ma comportano enormi problemi di sicurezza, e i costi di compressione e refrigerazione sono elevati. D'altra parte, ci sono numerosi approcci alternativi allo stoccaggio dell'idrogeno, basati essenzialmente su processi di "chemisorption" o "physisorption" dell'idrogeno su vari materiali di supporto. Fanno parte di questa categoria i vari idruri metallici, i nanotubi di carbonio e, più recentemente, i clatrati idrati. Infine, vanno considerati i vettori di idrogeno, quali ammoniaca, metanolo ed etanolo, che si basano sul "reforming" catalitico del vettore stesso per ottenere idrogeno.

Scopo di questo lavoro è di quantificare i parametri prestazionali dei diversi sistemi di stoccaggio al fine di determinare la migliore tecnologia disponibile e la migliore filiera tecnologica dalla produzione all'impiego finale dell' $H_2$ . Per ciascuna delle diverse soluzioni di stoccaggio, considerando un sistema costituito da  $H_2$ , vettore e recipiente, sono stati fissati i valori di densità energetica di  $H_2$  nel sistema (kWh/Kg e kWh/litro), % in massa di  $H_2$  nel sistema, densità del sistema (Kg/l), densità di  $H_2$  nel sistema e energia spesa (stoccaggio, trasporto e il ripristino fino a condizioni di impiego) su energia immagazzinata. I risultati degli studi effettuati sono riportati nel presente articolo in modo sintetico sotto forma di due tabelle e di una serie di grafici che meglio permettono di interpretare i dati riassunti nelle tabelle stesse.

Segue una breve descrizione dei vari sistemi presi in considerazione, e dei relativi parametri e processi utilizzati per

i calcoli.

### Idrogeno Compresso e Liquefatto

Al fine di determinare la reale efficienza dei sistemi di stoccaggio di idrogeno in forma compressa sono stati messi a confronto gli standard di compressione a 200 Bar, 350 Bar e 700 Bar. Per tutti questi sistemi è stata ricavata la densità netta del gas compresso applicando l'equazione di Van der Waals per i gas reali, e poi la densità reale del sistema di stoccaggio tenendo conto del peso e del volume del recipiente necessario per il contenimento del gas compresso. Per lo standard 200Bar si è tenuto conto delle classiche bombole in acciaio [1]. Analogamente si è proceduto per gli standard 350Bar e 700Bar: si sono considerati pesi e ingombri delle moderne bombole in alluminio corazzate con fibra di carbonio della QUANTUM [2] relativi ad uno stoccaggio on-board di 3Kg di idrogeno compresso.

Come per il compresso, anche per l'idrogeno liquido si è considerata la densità netta del liquido come tale e quella reale tenendo conto dei sistemi di contenimento in forma supercritica. Nello specifico per calcolare la densità netta si è tenuto conto di pesi e volumi di ingombro per un sistema LINDE di contenimento per il quale si è ricavato che solo il 48% del volume del sistema è disponibile per il contenimento del gas. Trattandosi di  $H_2$  in forma liquida esso necessita di essere rigassificato per poi essere usato in forma gassosa, in questo caso va tenuto conto del calore latente di vaporazione dell' $H_2$  liquido pari a 445.59 kJ/Kg e della non trascurabile capacità termica dell' $H_2$  gassoso, pari a 14.89 kJ/Kg K, che va riscaldato da 20.4K a T ambiente. Ovviamente nel caso dell'idrogeno liquido va tenuto conto del tasso di evaporazione che può essere stimato intorno al 2% al giorno.

## Idruri Metallici

Per quanto riguarda gli idruri metallici, si sono presi in considerazione 3 diversi sistemi molecolari: il  $\text{LaNi}_5\text{H}_6$  come rappresentante della categoria degli idruri a bassa temperatura (LTH), cioè quei metalli o leghe che subiscono idrogenazione e deidrogenazione reversibile a temperature prossime a quella ambiente, il  $\text{MgH}_2$  come rappresentante degli idruri ad alta temperatura (HTH), cioè quei metalli o leghe che subiscono idrogenazione e deidrogenazione reversibile a temperature sensibilmente superiori a quella ambiente (500-700 K) dove la gestione dei flussi di calore svolge un ruolo chiave nel processo, ed infine il  $\text{NaAlH}_4$  appartenete alla classe degli Alanati, cioè leghe contenenti alluminio che mostrano proprietà cinetiche e termodinamiche intermedie tra gli LTH e gli HTH [3-10]. Per il  $\text{MgH}_2$ , che è un HTH, la gestione dei flussi di calore svolge un ruolo critico, perciò importanti sono i valori di capacità termica, 1.63 kJ/Kg K, ed energia di idrogenazione/deidrogenazione, pari a 37500 kJ/KgH<sub>2</sub>. Infine si è analizzato il  $\text{NaAlH}_4$  come rappresentante della classe degli Alanati. Anche il  $\text{NaAlH}_4$  necessita di attenzione nella gestione dei flussi di calore che dipenderanno dalla sua capacità termica.

I dati sopra riportati danno una idea della capacità di stoccaggio teorica dei sistemi a metalli idruri e delle energie in gioco nei processi di assorbimento e rilascio di idrogeno. Va considerato però che i dati riportati sono solo teorici e ben lontani dalle capacità di stoccaggio realmente misurate, per quanto riguarda la capacità di stoccaggio in peso ad esempio va considerato che i metalli idruri sono tutti sistemi che non rilasciano completamente l'idrogeno immagazzinato, nelle sistemi con comportamenti migliori si hanno percentuali di rilascio che vanno da un minimo del 60% ad un massimo dell'80% problema che influisce sensibilmente sulla capacità reale di stoccaggio in peso. Anche per quanto riguarda la capacità di stoccaggio in volume si deve tenere conto della densità reale del sistema e non di quella netta nominale, infatti il sistema tutti i sistemi a metalli idruri si trovano in uno stato di aggregazione di polveri che raramente può raggiungere un impaccamento dell'80% della densità nominale, inoltre la elevata differenza di volume specifico tra la forma idrogenata e non comporta una variazione di volume di circa il 40% volume che deve essere lasciato libero all'idruo per espandersi con riduzione del volume utile del sistema di contenimento.

Tutti i sistemi inoltre sono stati analizzati inoltre senza tener conto del sistema di contenimento: che aggiunge peso per i materiali costruttivi, che spesso devono resistere a temperature e pressioni elevati durante la fasi di assorbimento e rilascio, e sottrae volume utile a causa spesso di complesse strutture per lo scambio termico. A titolo di esempio va fatto notare che per il  $\text{NaAlH}_4$ , con capacità di stoccaggio in peso teorica dell'8%, si sia arrivati solo allo 0.4% reale in peso in un prototipo dimostrativo del US-DOE [11]

## Nanotubi di Carbonio

Anche se attualmente si rivendichino elevate capacità teoriche di stoccaggio di idrogeno in nanotubi di carbonio a singola parete (SWNT), il risultato reale del 3% in peso ottenuto dal NREL sembra essere il migliore, [12] risultato ottenuto però a 77K e 20Bar di pressione. Il raffreddamento del sistema fino a 77K e la relativa rigassificazione sono i punti critici di questa tecnologia. Durante il processo di assorbimento infatti oltre a raffreddare il sistema di cui si può

stimare una capacità termica di 0.71 kJ/Kg K [13] si deve considerare di dover evacuare il non trascurabile calore di interazione H<sub>2</sub>-Nanotubo, calore che per una interazione sia con la parete interna che con quella esterna del nanotubo è stimabile a circa 18275 kJ/KgH<sub>2</sub> [14]. In fase di rigassificazione inoltre, oltre a rifornire tutto il calore sottratto durante l'assorbimento, si rende necessario anche il riscaldamento del idrogeno gassoso da 77K a T ambiente, calore non trascurabile come è già stato detto nel caso dell'idrogeno liquido.

Essendo i nanotubi, inoltre, una polvere solida essi soffrono gli stessi problemi di impaccamento degli idruri, e dovendo essere conservati a 77K, degli stessi problemi di evaporazione dell'idrogeno liquido che in questo caso può essere stimata a circa 2g/h.

## Idrogenazione reversibile di idrocarburi

Deidrogenando un idrocarburo si può ricavare idrogeno; se ad essere deidrogenato è un anello a 6 atomi di carbonio il prodotto di deidrogenazione sarà un anello aromatico che favorirà il processo di deidrogenazione per la sua elevata stabilizzazione energetica dovuta all'aromaticità. Questo è il caso della idrogenazione reversibile del benzene a cicloesano, che mostra uno stoccaggio di idrogeno stechiometrico del 7.2% in peso.

Il problema di questi sistemi sono però le condizioni abbastanza estreme a cui avvengono i processi di idrogenazione e deidrogenazione: infatti essendo il benzene molto stabile e il legame covalente C-H molto forte in fase di idrogenazione necessitano pressioni fino a 20 Bar e temperature dell'ordine dei 200-300°C [15]. Lo stesso vale per la deidrogenazione dove sono necessarie temperature di 200°C o maggiori al fine di convertire per via catalitica in maniera selettiva il cicloesano, al fine di ottenere un idrogeno privo di prodotti di conversioni secondarie [16]. Ovviamente, anche questi sistemi soffrono di una non completa conversione che nei casi migliori permette di recuperare solo 80% del contenuto di idrogeno.

## Ammoniaca

L'ammoniaca mostra un contenuto stechiometrico di idrogeno molto elevato, 17%, ed inoltre il recupero dell'idrogeno per via elettrolitica è favorito dal basso potenziale di dissociazione, circa 0.5V, anche se le cinetiche di dissociazione sono assai lente essa mostra il valore aggiunto di emettere solo N<sub>2</sub> come prodotto di scarto, gas non inquinante che può essere reperito ovunque.

Il problema dell'ammoniaca è però la sua produzione; infatti attualmente i migliori impianti di produzione consumano energia elettrica in quantità superiore al suo contenuto energetico in idrogeno [17]. Considerato che l'energia elettrica è solamente un vettore energetico prodotto da altre fonti con una resa di conversione può arrivare al 60% nei casi migliori, va da se che il costo energetico di produzione dell'ammoniaca supera di gran lunga la sua capacità di trasportare energia come idrogeno.

## Etanolo

Una miscela di acqua ed etanolo al 46% in peso di etanolo può essere convertita cataliticamente e stechiometricamente in anidride carbonica e idrogeno. La capacità di stoccaggio di idrogeno che ne deriva è del 12% in peso, quantità molto

interessante se si considera che si trasporta un liquido molto stabile in condizioni ambiente. Il problema sta però nel processo di conversione che necessita di elevate temperature e che deve limitare la concentrazione di etanolo al solo 12% in peso per avere un idrogeno libero da CO [18].

## Gas Idrati

I gas idrati sono ghiacci d'acqua che intrappolano ingenti quantità di gas. Formano gas idrati il metano, l'anidride carbonica, l'acido solfidrico e l'idrogeno, etc. L'acqua, in particolari condizioni, genera spontaneamente gabbie di poliedri nanostrutturati che intrappolano i gas.

Per quanto riguarda l'idrogeno, è teoricamente possibile immagazzinare in forma di idrato fino al 5% in peso (rapporto di compressione pari a 1/450 normal volumi di gas), ed è stato possibile realizzare in laboratorio un contenuto di H<sub>2</sub> in idrato di circa 4% in peso, con l'ausilio di piccole quantità di particolari stabilizzanti organici (0,1% co-former). Una delle attività di ricerca del CEMIN riguarda la ottimizzazione delle condizioni di stoccaggio di idrogeno in forma clatrato idrato, tramite l'utilizzo di nuovi co-former e stabilizzanti,[1] e l'invenzione di una innovativa nanotecnologia per l'ottimizzazione del processo di stoccaggio in condizioni implementabili su larga scala.[2].

I gas idrati si distinguono dagli altri materiali di stoccaggio dell'idrogeno per le loro caratteristiche di: 1) sicurezza: non esplodono e possono esser resi auto-estinguenti; 2) economicità: la componente principale è l'acqua, quindi non si prospettano problemi né di costo né di reperibilità del supporto; 3) efficienza: perde significato il concetto di numero di "refueling cycles"; 4) ecocompatibilità: notevole abbattimento dei problemi di smaltimento.

In definitiva, come si vedrà meglio nella discussione dei dati presentati nel presente articolo, gli idrati di idrogeno si presentano come una tecnologia estremamente competitiva nel campo dei materiali di stoccaggio dell'idrogeno.

## Metodi

Nel calcolo delle grandezze prese in considerazione per descrivere i diversi sistemi di stoccaggio sono state formulate delle ipotesi sui processi impiegati e sulle proprietà chimico fisiche delle sostanze che prendono parte ai processi stessi. Per quanto riguarda i processi si sono considerate [19-21]:

1. compressioni adiabatiche a singolo stadio senza interrefrigerazioni con rendimento di compressione pari a 0.85;
2. rendimento degli scambiatori termici pari a 0.8;
3. rendimento utile delle macchine preposte al raffreddamento pari a 3;
4. calore disponibile a temperatura ambiente infinito a costo energetico nullo;
5. assenza di recupero di calore nelle operazioni di compressione;
6. assenza di recupero entalpico nell'espansione dei gas;

Il comportamento reale del gas idrogeno è stato approssimato mediante modelli che impiegano [22]:

1. Van der Waals nelle equazioni di stato;
2. coefficienti di Langen nei processi di compressione.

Per sistema di stoccaggio e quindi anche nei calcoli delle

proprietà fisiche e delle proprietà energetiche che caratterizzano il sistema stesso, si considera l'insieme di H<sub>2</sub> vettore (su cui H<sub>2</sub> è imprigionato) e contenitore (che accoglie H<sub>2</sub> e vettore).

Ad esempio nel caso di H<sub>2</sub> gassoso stoccato a 200 bar nelle bombole si ha nel computo totale del sistema oltre all'idrogeno anche il contenitore con tutte le conseguenze di peso e volume.

Nel caso di stoccaggio in idruri abbiamo invece la presenza sia di H<sub>2</sub> sia di vettore (in questo caso appunto un idruro) sia del contenitore che ospita quest'ultimi.

Si definisce infine il SEC acronimo inglese di Specific Energy Consumption che rappresenta la richiesta energetica specifica per unità di massa o di volume necessaria per compiere una data trasformazione o un dato processo.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

Nella Tabella 1 e nella Tabella 2 sono riportati i risultati dei calcoli svolti. In particolare nella Tabella 1 sono riportate le grandezze fisico-chimiche del sistema quali:

- temperatura a cui è stoccato H<sub>2</sub>;
- pressione a cui è stoccato H<sub>2</sub>;
- densità netta dell'H<sub>2</sub> stoccato;
- densità del sistema (H<sub>2</sub>+vettore+recipiente);
- peso dell'H<sub>2</sub> immagazzinato su peso del sistema;
- capacità termica del binomio formato da H<sub>2</sub> e vettore;
- energia di dissociazione;
- calore latente del binomio formato da H<sub>2</sub> e vettore.

Nella Tabella 2 sono invece riportate le grandezze che caratterizzano il sistema e i processi da un punto di vista energetico:

- energia necessaria per sintetizzare il binomio H<sub>2</sub> vettore o per comprimere o liquefare il gas;
- energia necessaria per il ripristino fino a condizioni di impiego dell'H<sub>2</sub> immagazzinato;
- energia spesa per lo stoccaggio e il ripristino fino a condizioni di impiego su energia immagazzinata sotto forma di H<sub>2</sub>;
- energia trasportata sotto forma di H<sub>2</sub> su peso del sistema necessaria a trasportare l'H<sub>2</sub> stesso;
- energia trasportata sotto forma di H<sub>2</sub> su volume del sistema necessaria a trasportare l'H<sub>2</sub> stesso;
- CO<sub>2</sub> equivalente prodotta nei processi di stoccaggio e rilascio fino a condizioni di impiego.

Di seguito sono illustrati i grafici dei risultati più significativi emersi dallo studio fatto ed inseriti nelle tabelle di cui sopra. Ogni grafico è commentato nell'aspetto saliente che lo contraddistingue.

Tabella 1 : Proprietà fisiche e chimiche dei diversi sistemi di stoccaggio. Per sistema si intende : H<sub>2</sub>+vettore+recipiente.

Proprietà fisico-chimiche Sistema	Temperatura (H <sub>2</sub> ) K	Pressione (H <sub>2</sub> ) Bar	Densità Netta (H <sub>2</sub> ) Kg/m <sup>3</sup>	Densità (Sistema) Kg/m <sup>3</sup>	Peso H <sub>2</sub> /Peso sistema	Cap. Termica (H <sub>2</sub> + vettore) kJ/Kg K	Ediss (H <sub>2</sub> da vettore) kJ/KgH <sub>2</sub>	Calorelatente (H <sub>2</sub> + vettore) kJ/Kg	Sistema
<b>cH<sub>2</sub><sub>200</sub></b>	288	200	14.47	742.98 (1.50)	0.013	-	-	-	<b>H<sub>2</sub> compresso</b>
<b>cH<sub>2</sub><sub>350</sub></b>	288	350	22.50	310.00 (1.08)	0.067	-	-	-	
<b>cH<sub>2</sub><sub>700</sub></b>	288	700	35.01	500.00 (1.17)	0.060	-	-	-	
<b>LH<sub>2</sub></b>	20.4	1	70.08	444.44 (2.1)	0.075	14.89	-	445.59	<b>H<sub>2</sub> liquido</b>
<b>HMH(MgH<sub>2</sub>)</b>	288	1	107.00	1337.50*	0.08*	1.63	37500	-	<b>Idruri metallici H<sub>2</sub></b>
<b>LMH(LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub>)</b>	288	1	115.00	8214.28*	0.014*	3.03	16400	-	
<b>Alanate(NaAlH<sub>4</sub>)</b>	288	1	95.00	1187.5*	0.08*	2.04	42000	-	
<b>SWCnT</b>	77	1	35.00	1167*	0.03*	2.17(H <sub>2g</sub> )0.71c	18275	-	<b>Nanotubi H<sub>2</sub></b>
<b>NH<sub>3</sub></b>	288	6	144.94	817*	0.177*	2.17(H <sub>2g</sub> )	15375	1370	<b>Ammoniac H<sub>2</sub></b>
<b>C<sub>6</sub>H<sub>12</sub></b>	288	1	55.93	779*	0.072*	1,27c	34773	360c 544b	<b>Idrocarburi H<sub>2</sub></b>
<b>C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 46%</b>	288	1	110.7	922.6	0.12	3.57	28900	1649.96	
<b>HyH<sub>2</sub> 5%</b>	264	1	41.5	830.00*	0.05*	2.52	-	337.33	<b>Idrati H<sub>2</sub></b>
<b>HyH<sub>2</sub> 1%</b>	264	1	8.3	830.00*	0.01*	2.52	-	337.33	

\*Nel calcolo della massa complessiva del sistema non si è tenuto conto del peso del recipiente che contiene il vettore per mancanza di dati relativi allo stesso.

Tabella 2: Proprietà energetiche dei diversi sistemi di stoccaggio.

Proprietà energetiche / Sistema	E sintesi (H <sub>2</sub> + vettore) kJ/Kg	E trasporto kJ/Kg	E rilascio (H <sub>2</sub> da vettore) kJ/Kg	E spesa/E immagazzinata	E trasportata /Peso kWh/Kg (kJ/Kg)	E trasportata /Volume kWh/m <sup>3</sup> (MJ/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> equiv Kg	Sistema
<b>CH<sub>2</sub></b> <sub>200</sub>	17003.07	-	-	0.14	0.43 (1559.84)	321.93 (1158.93)	3.149	<b>H<sub>2</sub> compresso</b>
<b>CH<sub>2</sub></b> <sub>350</sub>	20504.38	-	-	0.17	2.23 (8039.20)	692.26 (2492.15)	3.797	
<b>CH<sub>2</sub></b> <sub>700</sub>	25471.05	-	-	0.21	2.00 (7199.28)	999.90 (3599.64)	4.717	
<b>LH<sub>2</sub></b>	36883.00	-	664.50	0.31	2.50 (8999.10)	1110.99 (3999.56)	6.258	<b>H<sub>2</sub> liquido</b>
<b>HMH(MgH<sub>2</sub>)</b>	1570.00	-	4170.00	0.59	2.67 (9599.04)	3566.31 (12838.72)	0.957	<b>Idruri metallici H<sub>2</sub></b>
<b>LMH(LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub>)</b>	217.00	-	306.00	0.29	0.50 (1799.82)	3832.95 (13798.63)	0.087	
<b>Alanate(NaAlH<sub>4</sub>)</b>	2280.00	-	3830.00	0.64	2.67 (9599.04)	33166.35 (11398.86)	1.020	
<b>SWNTH<sub>2</sub></b>	3429.6	-	84.28	0.98	0.99 (3599.64)	599.94 (2159.78)	0.651	<b>Nanotubi H<sub>2</sub></b>
<b>NH<sub>3</sub></b>	3662.47	-	4531.60	0.39	5.90 (21237.88)	4819.82 (17351.345)	1.29	<b>Ammoniaca H<sub>2</sub></b>
<b>C6H12</b>	1450.6	-	3435.00	0.56	2.34 (8639.14)	1869.41 (6729.89)	0.814	<b>Idrocarburi H<sub>2</sub></b>
<b>C2H5OH 46%</b>	-	-	5421.03	0.38	4.00 (14398.56)	3690.03 (13284.11)	1.00	
<b>HYH2 5%</b>	756.14	-	55.89	0.13	1.67 (5999.4)	1383.20 (4979.50)	0.15	<b>Idrati H<sub>2</sub></b>
<b>HYH2 1%</b>	290.22	-	55.89	0.29	0.33 (1199.88)	276.64 (995.90)	0.06	

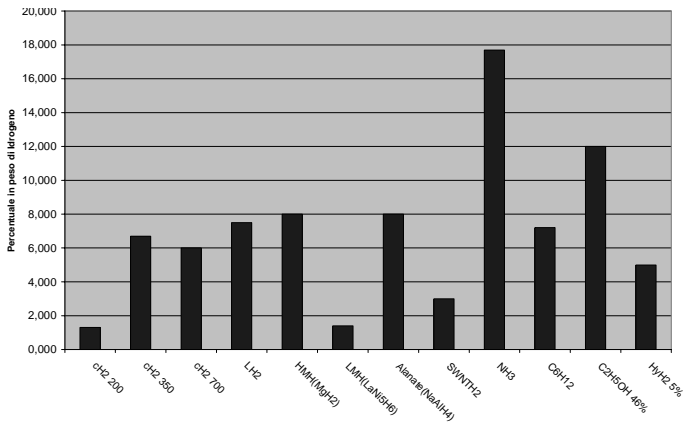


Figura 1: Capacità teorica di stoccaggio in percentuale in peso. Sono riportate le capacità teoriche; si noti che, per alcuni sistemi come idruri e nanotubi, le capacità effettivamente raggiunte sono una piccola frazione della capacità indicata come teorica.

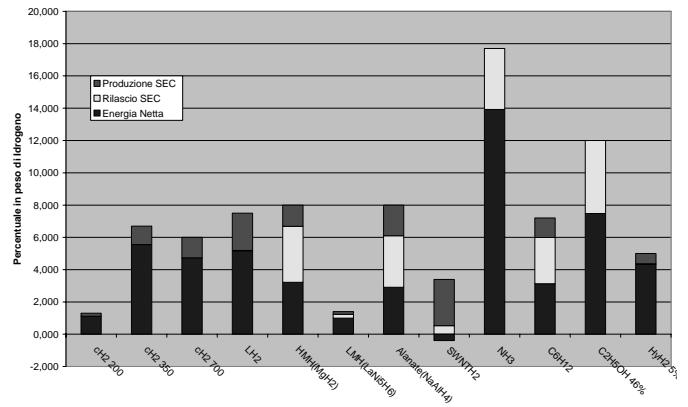


Figura 4: Energia netta immagazzinata considerando ancora il limite percentuale teorico in peso di stoccaggio e il SEC per i processi di produzione e di rilascio. Si nota come il fattore SEC assume una notevole importanza nel caso di idruri metallici, nanotubi e composti covalenti. Nell'ammoniaca non è riportata l'energia di produzione.

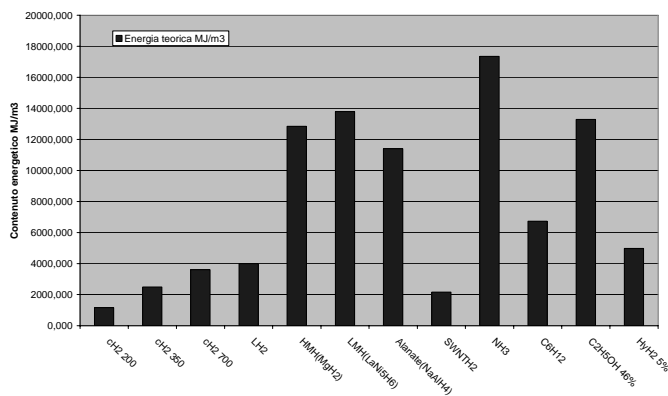


Figura 2: Energia teorica stoccata per unità di volume in MJ/m<sup>3</sup>. Anche in questo caso, vale il commento fatto nella legenda alla Figura 1 riguardante il significato di capacità teorica.

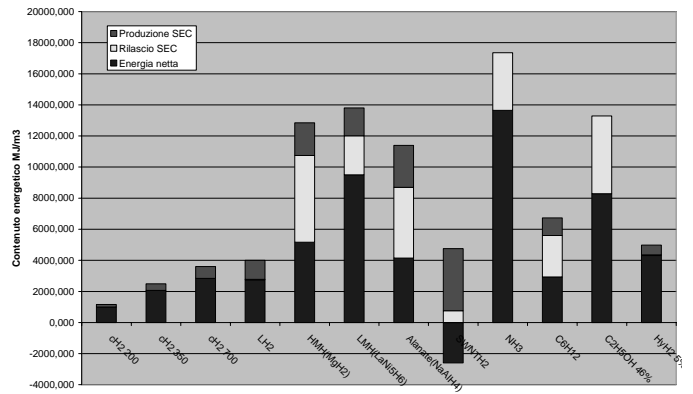


Figura 5: Energia netta teorica per unità di volume immagazzinata considerando il SEC per i processi di produzione e di rilascio. Vale il commento alla Figura 4.

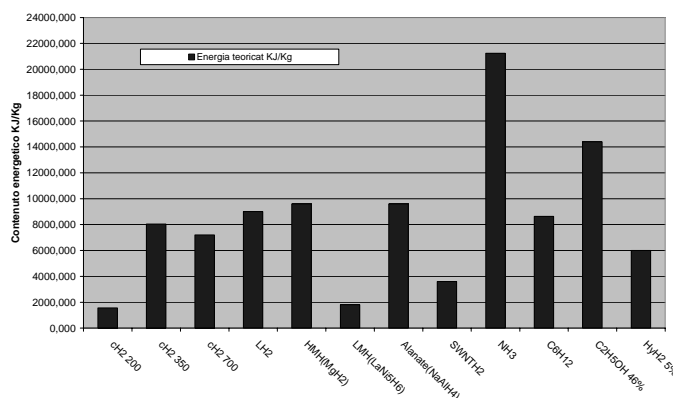


Figura 3: Energia teorica stoccata per unità di massa kJ/Kg. Vedi commento alle Figg. 1 e 2.

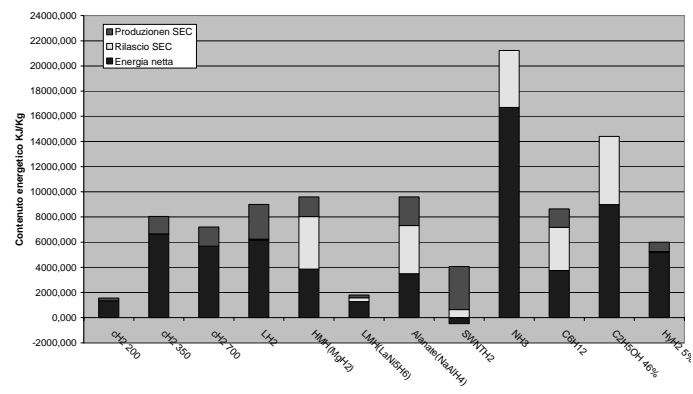


Figura 6: Energia netta teorica per unità di massa immagazzinata considerando il SEC per i processi di produzione e di rilascio. Vale il commento alla Figura 4.

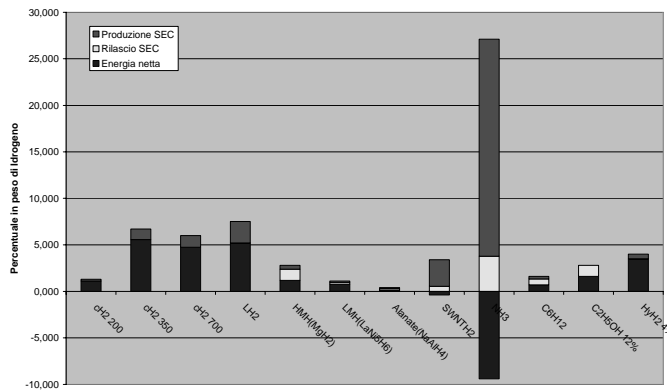


Figura 7: Energia netta immagazzinata considerando performance reali del sistema e il SEC per i processi di produzione e di rilascio. Da questo grafico e dai successivi si vede chiaramente che i sistemi "innovativi" di stoccaggio dell'idrogeno escono dalla competizione con i sistemi tradizionali basati su compressione elevata e liquefazione. L'unica notevole eccezione è costituita dall'idrato di idrogeno.

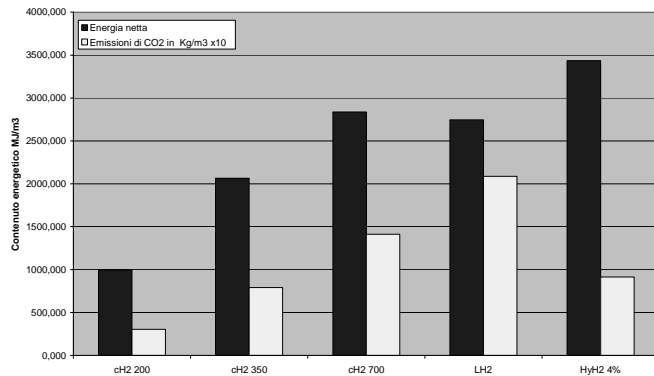


Figura 10: Energia netta immagazzinata per unità di volume considerando i sistemi con migliori performance e relative emissioni di CO<sub>2</sub> per i processi di stoccaggio stessi. Si nota che l'idrato di idrogeno risulta miglior performer anche rispetto allo standard di compressione a 700 bar.

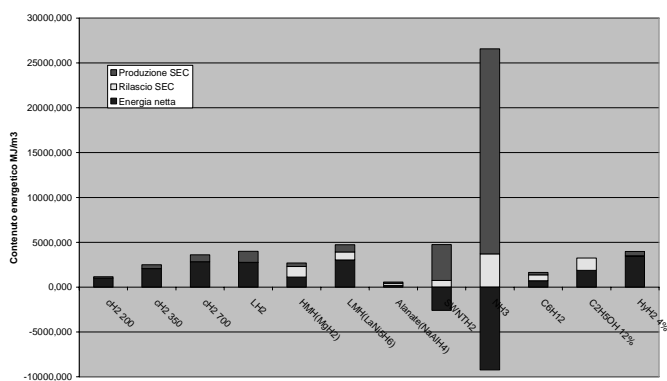


Figura 8: Energia netta immagazzinata per unità di volume considerando performance reali del sistema e il SEC per i processi di produzione e di rilascio.

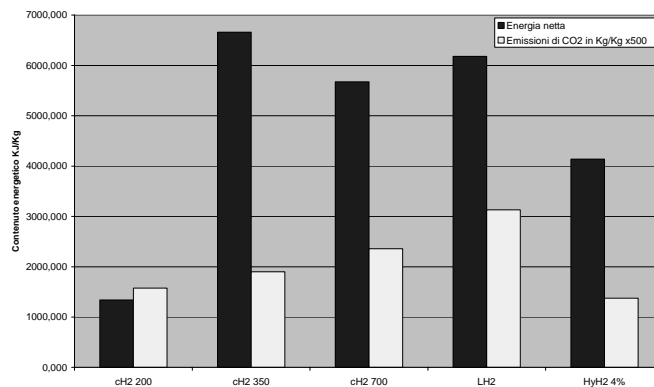


Figura 11: Energia netta immagazzinata per unità di massa considerando i sistemi con migliori performance e relative emissioni di CO<sub>2</sub> per i processi di stoccaggio stessi. I sistemi di compressione a 350 bar e H<sub>2</sub> liquido risultano i migliori performer. L'idrato mantiene un buon livello di competitività.

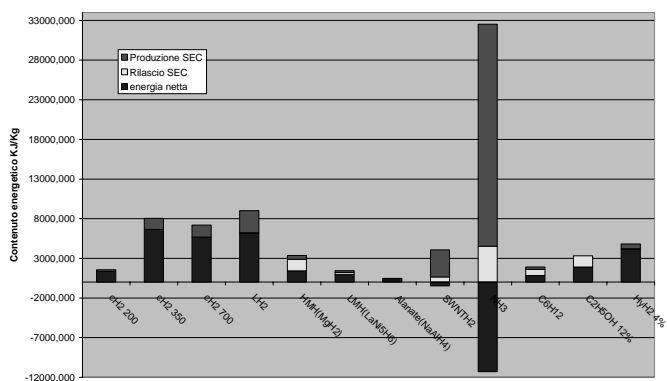


Figura 9: Energia netta immagazzinata per unità di massa considerando performance reali del sistema e il SEC per i processi di produzione e di rilascio.

## CONCLUSIONI

La ricerca a livello globale di nuovi sistemi di stoccaggio e trasporto dell'idrogeno assume connotati sempre più parossistici, e gli investimenti sulle varie tecnologie "innovative" sono generosi ma, forse, poco illuminati. Il presente studio svela in maniera semplice e sostanziata che i migliori sistemi a idruri metallici attualmente disponibili si pongono in condizioni scarsamente competitive con i sistemi convenzionali di compressione e liquefazione. La situazione è ancora peggiore per i nanotubi di carbonio, e anche l'ammoniaca sconta dei costi di produzione elevatissimi che ne rendono negativo in contenuto energetico netto. Gli idrati di idrogeno al 4% in peso costituirebbero l'unico sistema innovativo che mantiene una buona competitività con i sistemi tradizionali. Va però sottolineato che il presente studio non ha preso in considerazione i costi dei materiali di stoccaggio e la loro disponibilità in vista dell'uso su larghissima scala, così come non ha considerato i costi aggiuntivi derivati dal problema del loro smaltimento a fine ciclo, o della loro tossicità *tout court* (v. nanotubi). Se poi si tiene conto anche del fattore sicurezza relativo a stoccaggio e trasporto di

idrogeno in forma compressa o liquefatta si evince, abbastanza sorprendentemente, che l'unica tecnologia praticabile, benché ancora da sviluppare, sia quella basata sugli idrati di idrogeno. CEMIN e CIRIAF presenteranno, in ambito 7° Programma Quadro della Comunità Europea, un progetto di ricerca cooperativo dedicato proprio alla ottimizzazione e applicazione di questa tecnologia innovativa.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Dati ottenuti da Air Liquide.
2. DOE: Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies - FY 2002 Progress Report Section III.A High Pressure Tanks
3. Metal Hydride Storage Requirements for Transportation Applications, Ali T-Raissi, Arundhati Banerjee, Kenneth Sheinkopf - Florida Solar Energy Center pp 2280-2285
4. Low-temperature heat-capacity study of Haucke compounds  $\text{CaNi}_5$   $\text{YNi}_5$   $\text{LaNi}_5$  and  $\text{ThNi}_5$  T. Takeshita, et al. - *Physical Review B* volume 21 number 12 - 15 June 1980 pp 5636-5641
5. Specific features of the thermodynamics of activation in the  $\text{LaNi}_5\text{—H}_2$  and  $\text{CeNi}_5\text{—H}_2$  systems N. A. Yakovleva, et al. - *Russian Chemical Bulletin, International Edition*, Vol. 54, No. 1, pp. 135—140, January, 2005
6. Hydride Information Center  
<http://hydpark.ca.sandia.gov/>
7. A simple adiabatic low-temperature calorimeter based on a helium refrigerator system, U. Wolf, et al. *Thermochimica Acta* 310 (1998) 37-42
8. High Density Hydrogen Storage System Demonstration Using  $\text{NaAlH}_4$  Based Complex Compound Hydrides Daniel A. Mosher US-DOE IV.A Hydrogen Storage / Metal Hydrides-Independent Projects 2006
9. Lattice dynamics and thermodynamic properties of  $\text{NaAlH}_4$ : Density-functional calculations using a linear response theory A. Peles and M. Y. Chou, - *PHYSICAL REVIEW B* 73, 184302 2006
10. A First Principles Study of Hydrogen Storage in  $\text{NaAlH}_4$ -Related Complex Hydrides M. E. Arroyo et al., *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2005, 631, 1982-1984
11. High Density Hydrogen Storage System Demonstration Using  $\text{NaAlH}_4$  Based Complex Compound Hydrides Donald L. Anton DOE Hydrogen Program FY 2005 Progress Report
12. Go/No-Go Decision: Pure, Undoped Single Walled Carbon Nanotubes for Vehicular Hydrogen Storage U.S.
13. Quantized Phonon Spectrum of Single-Wall Carbon Nanotubes, J. Hone et al., 8 September 2000 Vol 289 *Science*
14. *J. Am. Chem. Soc.* 2001, 123, 5845-5846
15. Temperature Dependence of Benzene Hydrogenation Over Sulfide Catalysts, M.V. Sidiyakin, et al., *React.Kinet.Catal.Lett.* Vol. 77, No. 2, 287-292 (2002)
16. Selective dehydrogenation of cyclohexene to benzene using Pd-exchanged  $\alpha$ -zirconium phosphate, R.B. Borade et al., *Catalysis Letters* 45 (1997) 233-235
17. Energy efficiency improvements in ammonia production—perspectives and uncertainties Islam Rafiqul, et al., *Energy* 30 (2005) 2487–2504
18. Production of Hydrogen by Reforming of Crude Ethanol, Abayomi John Akande, Thesis, Department of Chemical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan
19. Mauro Felli, *Lezioni di Fisica Tecnica Volume Primo, Termodinamica, Macchine, Impianti*, Morlacchi Editore.
20. Sergio Stecco, *Manfrida Giampaolo, Le Turbomacchine*, Editore Pitagora
21. Sergio Stecco, *Impianti di Conversione Energetica*, Editore Pitagora
22. Peter Atkins W, De Paula Julio, *Chimica Fisica*, Editore Zanichelli
23. Di Profio P., Arca S., Germani R., Savelli G., 2006, "Novel Nanostructured Media for Gas Storage and Transport: Clathrate Hydrates of Methane and Hydrogen", *J. Fuel Cell Sci. & Tech.*, February 2007, vol. 4.
24. Arca, S., Di Profio, P., Germani, R., Savelli, G., International Patent Application PCT/IT/2006/000

## PRODUZIONE DI IDROGENO MEDIANTE SONOFOTOLISI CATALIZZATA: IMPIEGO DI SOLUZIONI SOLIDE DI OSSIDI DI LANTANIO, INDIO E GALLIO

F. Elisei<sup>1</sup>, P. L. Gentili<sup>1</sup>, F. Ortica<sup>1</sup>, F. Rossi<sup>2</sup>, M. Urbani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Perugia, via Elce di Sotto, 8 – 06123 Perugia

<sup>2</sup>Università degli Studi di Perugia, via G. Duranti, 67 – 06125 Perugia

### SOMMARIO

Nel presente lavoro sono riportati i risultati sperimentali relativi alla produzione di idrogeno mediante un processo sonofotocatalitico di scissione della molecola d'acqua. La sonofotocatalisi sperimentata è un processo che realizza la rottura del legame covalente O-H della molecola di acqua mediante l'impiego simultaneo di radiazione luminosa ed ultrasuoni, su un campione d'acqua contenente ossidi metallici ed un agente sacrificale.

Il lavoro ha previsto la progettazione e la realizzazione di un reattore per l'effettuazione di prove di sonofotolisi al variare della lunghezza d'onda della radiazione incidente e della frequenza degli ultrasuoni applicati. In particolare lo studio ha riguardato l'esecuzione di prove con lampade ad ultravioletti (da 180, 310 e 360 nm) e lampade solari (xeno). I fotocatalizzatori studiati sono soluzioni solide di ossidi di lantanio, indio e gallio.

Il metodo proposto suggerisce interessanti sviluppi riguardanti lo studio della scissione dell'acqua con l'impiego di membrane a permeabilità selettiva, differenti agenti sacrificali da miscelare in acqua e sostanze in grado di stoccare l'idrogeno prodotto direttamente nell'acqua.

### INTRODUZIONE

La quasi totalità della richiesta energetica mondiale è fronteggiata mediante l'impiego di fonti fossili. Le previsioni circa la disponibilità di tali fonti mostrano che le scorte attuali saranno sufficienti a coprire il fabbisogno energetico solo per i prossimi cinquanta anni; l'uso intenso di queste fonti comporta inoltre un irreversibile incremento delle emissioni inquinanti in atmosfera con gravi conseguenze climatiche.

Una possibile soluzione a questi problemi è rappresentata dall'impiego dell'idrogeno quale fonte energetica alternativa ai combustibili fossili. La combustione di tale combustibile genera esclusivamente vapore acqueo, il suo impiego quindi non produce effetti dannosi all'ambiente. A fronte di tali vantaggi, l'idrogeno presenta tuttavia il problema di essere disponibile in natura solo in forma combinata. La sua produzione richiede sempre l'impiego di una fonte di energia (fossile, rinnovabile, nucleare). A tale riguardo particolarmente interessanti risultano i sistemi di produzione che impiegano fonti rinnovabili per la produzione di idrogeno dall'acqua. Tali processi infatti, oltre a non costituire fonte di emissioni inquinanti, impiegano acqua quale composto di partenza per l'ottenimento di H<sub>2</sub> che, oltre ad essere l'elemento più largamente diffuso sul nostro pianeta, viene rigenerato a seguito dell'impiego dell'idrogeno stesso.

Nel presente lavoro viene studiato il fenomeno della sonofotolisi dell'acqua, ovvero il processo di scissione della molecola in idrogeno ed ossigeno mediante l'azione combinata di ultrasuoni (i quali generano il fenomeno della cavitazione dell'acqua), di radiazione luminosa e di fotocatalizzatori costituiti da soluzioni solide di ossidi di lantanio, indio e gallio.

Le prove sperimentali hanno riguardato lo studio delle proprietà spettrali di tre differenti tipologie di fotocatalizzatore

e la produzione di idrogeno mediante il processo di sonofotolisi catalizzata.

### LA SONOFOTOLISI

La sonofotolisi dell'acqua è un processo di scissione molecolare che impiega l'effetto combinato della sonolisi e della fotolisi [1].

La sonolisi dell'acqua prevede la scissione della molecola mediante l'impiego di onde meccaniche di opportuna frequenza, generate da trasduttori piezoelettrici in grado di cedere all'acqua energia attraverso gli ultrasuoni; quest'ultimi inducono nel liquido il fenomeno della cavitazione, il quale crea, localmente, condizioni di pressione e temperatura adatte alla formazione di idrogeno [2].

Le reazioni sonochimiche dell'acqua avvengono in più stadi:



L'idrogeno e il perossido di idrogeno vengono prodotti dalla dimerizzazione dei rispettivi radicali (equazioni (2) e (3)). La produzione di idrogeno è accompagnata dallo sviluppo di ossigeno dovuto alla reazione di decomposizione del perossido di idrogeno, il quale è instabile in condizioni standard e disproporziona formando acqua ed ossigeno.

L'energia necessaria alla reazione (1) viene fornita dagli ultrasuoni i quali inducono, attraverso onde successive di compressione e di espansione (figura 1), il fenomeno della

cavitazione acustica. Durante le fasi di espansione si ha la formazione nell'acqua di bolle di vapore e di altri gas disciolti nella stessa. Una volta formatesi, le bolle sollecitate meccanicamente iniziano a vibrare con frequenza pari a quella della sollecitazione meccanica

Le vibrazioni determinano l'espansione delle bolle fino alla formazione al loro interno di condizioni simili al vuoto; poiché intorno alla bolla è presente una pressione infinitamente maggiore, la bolla implode alla velocità di 1,4 chilometri al secondo. In quel momento la temperatura all'interno della bolla è dell'ordine dei 5000 Kelvin. Non esiste ancora una spiegazione completa del fenomeno. La teoria più accreditata assegna alla ionizzazione la responsabilità della generazione di onde luminose e calore [3]. Il gas che rimane intrappolato all'interno della bolla viene attraversato dalle onde d'urto provocate dalle altre bolle: in questo modo si verifica un riscaldamento tale che i suoi elettroni acquistano l'energia sufficiente per staccarsi dai propri atomi; successivamente questi ultimi collidono e vengono ricatturati, restituendo l'energia cinetica sotto forma di calore.

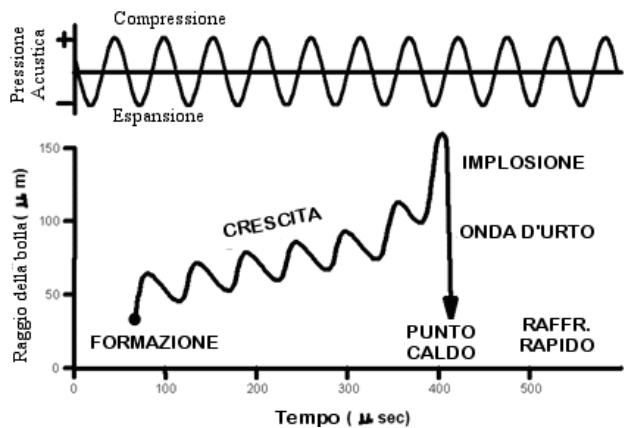


Figura 1: Dimensione della bolla in funzione del tempo.

La fotolisi prevede la scissione delle molecole d'acqua ad opera della radiazione luminosa. Il valore minimo della frequenza della radiazione necessario per scindere il legame O-H (460 kJ/mol) si ottiene dall'equazione (6).

$$E = h\nu \quad (6)$$

Esso corrisponde a  $1.15 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$  ovvero a 260 nm come lunghezza d'onda.

Considerando che la componente UV nello spettro solare è presente in misura minore rispetto a quella del visibile e dell'infrarosso e che lo strato di ozono presente nella parte superiore dell'atmosfera costituisce una vera e propria barriera all'ultravioletto, si deduce che la radiazione disponibile al suolo sia quasi totalmente priva dell'energia richiesta a tale scopo (figura 2).

Tenendo conto della distribuzione spettrale della radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre, si può pensare di sfruttarne al meglio le componenti UV-visibili facendo uso di opportuni fotocatalizzatori in grado di decomporre l'acqua in  $\text{H}_2$  ed  $\text{O}_2$ . Il fotocatalizzatore può essere un semiconduttore. A differenza dei metalli che hanno un continuo di stati elettronici, i semiconduttori possiedono una regione energetica dove non vi sono livelli che inducano la ricombinazione di coppie elettrone-buca generate per assorbimento di radiazione. Questa regione si colloca tra l'estremità superiore della banda

di valenza e l'estremità inferiore della banda di conduzione ed è chiamata band gap (BG). I principali passaggi di una reazione fotocatalitica sono mostrati schematicamente in figura 3.

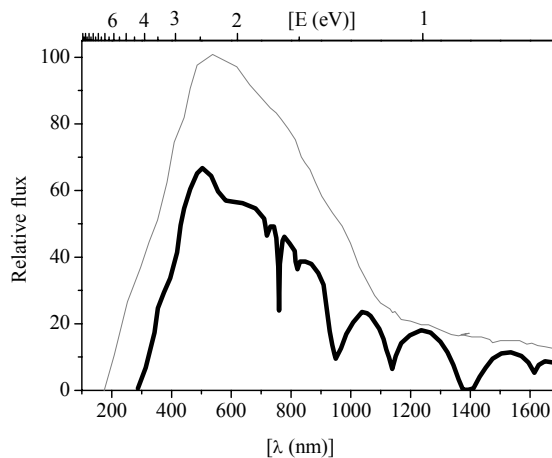


Figura 2: Spettro solare fuori dell'atmosfera terrestre (linea grigia) -spettro sulla superficie terrestre (linea nera).

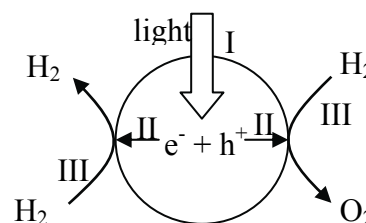


Figura 3: Processi nelle reazioni fotocatalitiche: (I) assorbimento della luce e produzione di coppie elettrone-buca; (II) migrazione delle cariche verso la superficie del fotocatalizzatore; (III) reazioni chimiche superficiali.

Il primo passaggio (I) consiste nell'assorbimento di fotoni e formazione di coppie elettrone-buca. Il secondo step (II) prevede la migrazione dei portatori di carica verso la superficie del fotocatalizzatore senza che si abbia ricombinazione. Il terzo passaggio consiste nelle reazioni ossidoriduttive sulla superficie del semiconduttore. Al fine di produrre  $\text{H}_2$  è necessario che il potenziale elettrico associato alla banda di conduzione sia più negativo del potenziale di riduzione dell'idrogeno dell'acqua (equazione 7):

$$E(\text{CB}) < E(\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2) \approx (0) \text{V} - 2.3(\text{RT}/\text{F})\text{pH} \quad (7)$$

Al fine di produrre  $\text{O}_2$  è necessario che il potenziale elettrico associato con la banda di valenza sia più positivo di quello della coppia  $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  (equazione 8):

$$E(\text{VB}) > E(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) \approx (1.23) \text{V} - 2.3(\text{RT}/\text{F})\text{pH} \quad (8)$$

Le condizioni fissate dall'equazioni (7) e (8) implicano l'uso di semiconduttori con un band gap più grande di 3 eV per cui essi saranno in grado di assorbire solo radiazione UV e non visibile.

Si può ovviare a quest'inconveniente se in acqua si introduce una specie chimica sacrificale. Se l'obiettivo della sonofotolisi dell'acqua consiste nel produrre  $\text{H}_2$ , la specie sacrificale deve essere scelta tra i composti chimici più

facilmente ossidabili rispetto all'ossigeno dell'acqua. L'uso di sostanze sacrificali consente l'impiego di semiconduttori dotati di band gap ristretti, in grado di assorbire una porzione ampia dello spettro solare.

## STUDIO DEI FOTOCATALIZZATORI IMPIEGATI

Gli ossidi  $Ga_2O_3$  (purezza 99.999%),  $In_2O_3$  (99.999%) e  $La_2O_3$  (99.999%) della Sigma-Aldrich sono stati utilizzati senza ulteriore purificazione.

Per preparare le soluzioni solide, i tre ossidi sono stati dapprima mescolati e macinati finemente. Quindi sono stati calcinati (scaldandoli fino a 1100 °C) per circa 12 h in un crogiolo di platino, all'interno di una muffola.

Gli spettri di riflettanza UV-Vis. delle soluzioni solide sono stati registrati con uno spettrofotometro Varian 4000 dotato di sfera integratrice. Il  $BaSO_4$  è stato utilizzato come materiale di riferimento con riflettanza del 100%.

L'attività fotocatalitica delle soluzioni solide degli ossidi (0,4 g) è stata testata in soluzioni acquose di etanolo ( $H_2O$  1000 ml,  $CH_3CH_2OH$  100 ml).

E' noto [4] che soluzioni solide degli ossidi di Ga ed In hanno attività fotocatalitiche per la produzione di idrogeno da soluzioni di acqua e metanolo. L'indio ha la caratteristica di ridurre il band gap del materiale semiconduttore mentre il gallio garantisce un potenziale ossidoriduttivo della banda di conduzione sufficientemente negativo. Per migliorare le proprietà catalitiche, si è pensato di aggiungere  $La^{+3}$  come terzo componente. La scelta è stata effettuata tenendo in considerazione le proprietà ossidoriduttive del lantanio (esso è un forte agente riducente) ed il valore del raggio ionico di  $La^{+3}$  che non deve differire di molto da quello degli ioni  $Ga^{+3}$  ed  $In^{+3}$  (tabella 1).

Tabella 1: Potenziali ossidoriduttivi ( $E^0$  (V)) e raggi ionici ( $R(M^{+3})$  (Å)) degli ioni di La, Ga ed In.

	$E^0$ (V)	$R(M^{+3})$ (Å)
$La^{+3}$	-2.37	1.06
$Ga^{+3}$	-0.35	0.62
$In^{+3}$	-0.34	0.81

Nelle figura 6 sono riportati gli spettri di assorbimento degli ossidi di lantanio, gallio ed indio in unità Kubelka-Munk.

## APPARATO SPERIMENTALE

L'apparato sperimentale (figura 4) è costituito da un reattore di forma cilindrica, nel quale viene inserito il campione d'acqua per l'esecuzione delle prove, da un sistema di generazione di ultrasuoni e da un apparato per la generazione di radiazione luminosa.

Il reattore è realizzato in acciaio, chiuso superiormente da una lastra di vetro al quarzo di elevata purezza al fine di garantire, grazie alle sue proprietà di trasparenza ottica, il passaggio di tutte le lunghezze d'onda prodotte dal sistema di generazione della radiazione luminosa; la tenuta è garantita da un collegamento flangiato e da due O-Ring in Viton (figura 5).

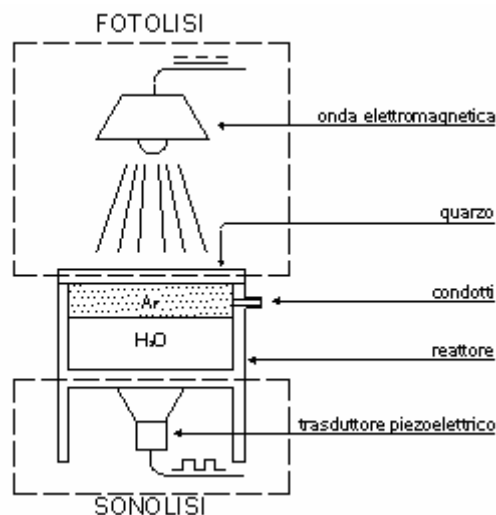


Figura 4: Schematizzazione dell'apparato di sonofotolisi.

Gli ultrasuoni, con frequenza di funzionamento di 38 kHz sono generati da un trasduttore piezoelettrico posizionato nella parte inferiore del reattore;

Per la generazione della radiazione luminosa sono stati impiegati quattro differenti tipi di lampade:

- lampada allo xeno (per la simulazione dello spettro solare);
- lampada UV con spettro di emissione da 180 nm al visibile;
- lampada UV con spettro di emissione da 310 nm al visibile;
- lampada UV con spettro di emissione da 360 nm al visibile.



Figura 5: Reattore sonofotolitico realizzato.

Per le analisi delle specie prodotte all'interno del reattore è stato impiegato un gascromatografo MicroGC CP-4900 della Varian, provvisto di una colonna con setacci molecolari, con detector di tipo TCD (Thermal Conductivity Detector).

## INDAGINI SPERIMENTALI

Le indagini sperimentali hanno previsto lo studio delle proprietà spettrali di tre differenti tipologie di fotocatalizzatori ed il successivo impiego degli stessi nel reattore sonofotolitico per verificare la loro efficacia in termini di produzione di idrogeno.

La prima fase della sperimentazione ha riguardato la misura del band gap e delle proprietà di assorbimento dei singoli ossidi; i risultati ottenuti sono raffigurati in figura 6.

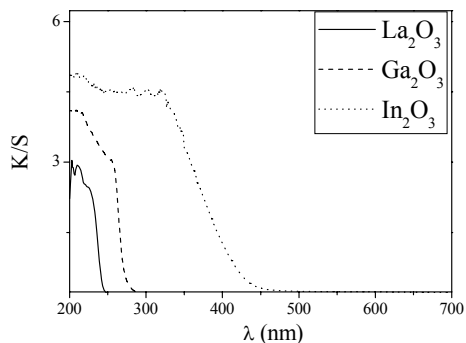


Figura 6: Spettri di assorbimento di  $\text{La}_2\text{O}_3$  (linea continua),  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (linea tratteggiata) e  $\text{In}_2\text{O}_3$  (linea punteggiata).

Dall'analisi degli spettri si evince che il band gap (BG) per  $\text{La}_2\text{O}_3$  è di 5.15 eV ( $\lambda=241$  nm), quello per  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  è di 4.55 eV ( $\lambda=273$  nm), mentre quello per  $\text{In}_2\text{O}_3$  ( $\lambda = 415$  nm) è pari a 3.00 eV.

Sfruttando reazioni acido-base ad alte temperature ( $T \leq 1100^\circ \text{C}$ ), sono state successivamente preparate tre soluzioni solide aventi rispettivamente stechiometria pari a  $\text{La}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{InO}_3$ ,  $\text{La}_{0.5}\text{GaIn}_{0.5}\text{O}_3$  e  $\text{LaGa}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{O}_3$ .

La misura delle proprietà fotoelettriche delle tre soluzioni (vedi figura 7) ha mostrato per la miscela  $\text{La}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{InO}_3$  un valore elevato del coefficiente di assorbimento nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 200 e 400 nm ( $\text{BG}_{\text{max}} = 3.53$  eV per  $\lambda = 352.6$  nm), mentre per le miscele  $\text{La}_{0.5}\text{GaIn}_{0.5}\text{O}_3$  e  $\text{LaGa}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{O}_3$  valori elevati del coefficiente di assorbimento esclusivamente nell'intervallo di lunghezze d'onda dell'ultravioletto in virtù delle maggiori percentuali rispettivamente di gallio e di lantanio ( $\text{BG}_{\text{max}} (\text{La}_{0.5}\text{InGa}_{0.5}\text{O}_3) = 2.92$  eV per  $\lambda = 426$  nm;  $\text{BG}_{\text{max}} (\text{LaIn}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_3) = 3.96$  eV per  $\lambda = 314$  nm).

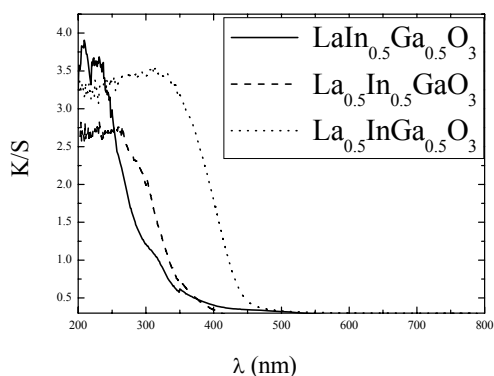


Figura 7: Spettri di assorbimento di  $\text{La}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{GaO}_3$  (linea continua), di  $\text{La}_{0.5}\text{InGa}_{0.5}\text{O}_3$  (linea tratteggiata) e di  $\text{LaGa}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{O}_3$  (linea punteggiata).

La seconda fase della sperimentazione ha riguardato l'effettuazione di prove di produzione di idrogeno mediante l'impiego del reattore sonofotolitico e di campioni di sola acqua bidistillata, di miscele di acqua bidistillata ed etanolo (1000 ml di  $\text{H}_2\text{O}$ , 100 ml di  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ) e di miscele di acqua bidistillata, etanolo e fotocatalizzatori (1000 ml di  $\text{H}_2\text{O}$ , 100 ml di  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ , 0,4 g di fotocatalizzatore). Di seguito si riporta la successione delle prove effettuate:

- fotolisi della sola acqua bidistillata mediante lampade UV e lampade allo xeno;
- fotolisi della soluzione acqua bidistillata-etanolo mediante

- lampade UV e lampade allo xeno;
- fotolisi della soluzione acqua bidistillata-etanolo mediante lampade UV e lampade allo xeno, con impiego di tutte e tre le diverse tipologie di fotocatalizzatore;
- sonolisi della soluzione acqua bidistillata-etanolo;
- sonofotolisi catalizzata della soluzione acqua bidistillata-etanolo.

Tutte le prove sono state effettuate con condizioni di temperatura e pressione all'interno del reattore sonofotolitico costanti ( $20^\circ \text{C}$ , 1 bar).

L'analisi dei risultati delle prove di fotolisi condotte con differenti sorgenti di radiazione luminosa e con differenti tipologie di miscele di campione (figg. 8, 9, 10, 11) mostrano che la produzione di idrogeno aumenta all'aumentare della frequenza della radiazione luminosa indipendentemente dalla tipologia di fotocatalizzatore in soluzione. Tuttavia mentre per la lampada con spettro di emissione fino a 180 nm i valori di produzione di idrogeno più elevati (180  $\mu\text{mol}$  dopo circa 6 ore di funzionamento) sono ottenuti con il fotocatalizzatore  $\text{La}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{GaO}_3$  (vedi figura 8), per le lampade con spettro di emissione fino a 310 e 360 nm i risultati migliori, in termini di produzione di  $\text{H}_2$ , si ottengono con il fotocatalizzatore  $\text{La}_{0.5}\text{InGa}_{0.5}\text{O}_3$  (vedi figura 9 e 10).

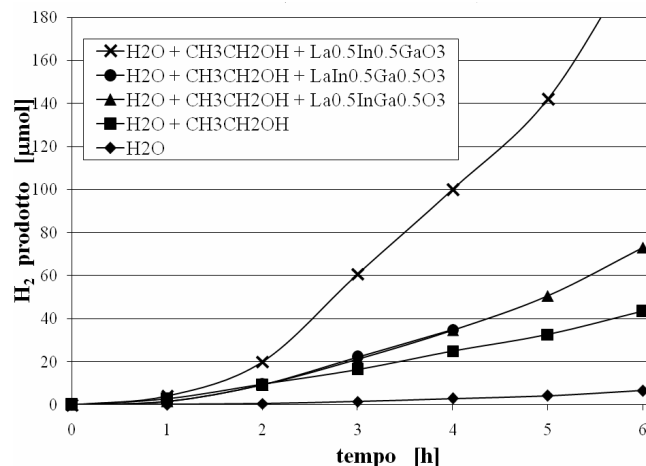


Figura 8: Fotolisi ottenuta con lampada UV da 180 nm al visibile.

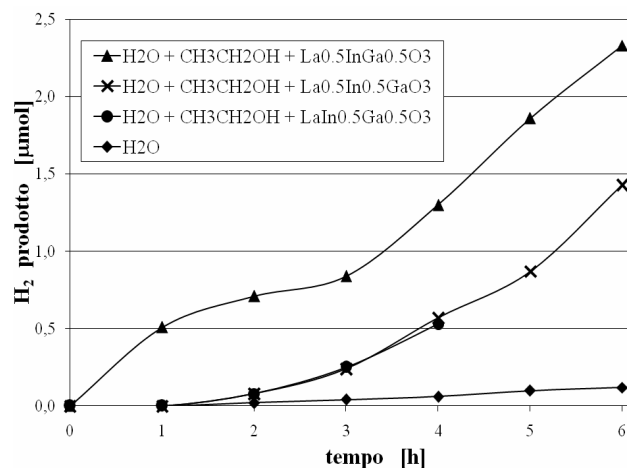


Figura 9: Fotolisi ottenuta con lampada UV da 310 nm al visibile.

Per quanto riguarda le prove di fotolisi effettuate con la lampada allo xeno, i risultati mostrano che la produzione di idrogeno maggiore si verifica con l'impiego in soluzione del fotocatalizzatore  $\text{LaIn}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_3$  (vedi figura 11).

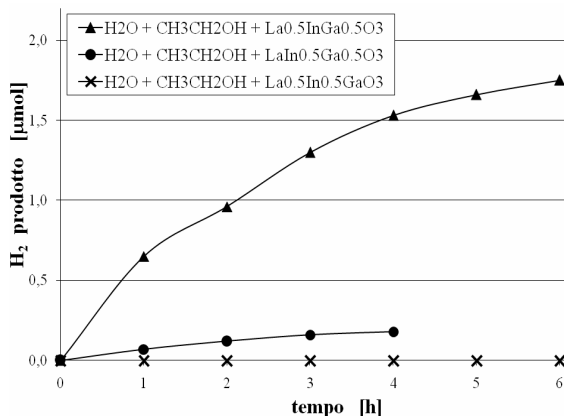


Figura 10: Fotolisi ottenuta con lampada UV da 360 nm.

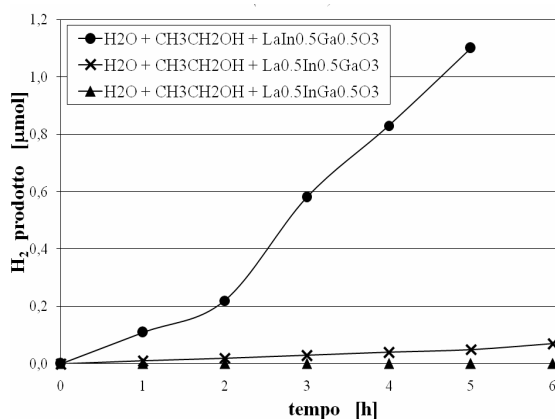


Figura 11: Fotolisi ottenuta con lampada allo xeno.

Scopo finale del presente lavoro è la massimizzazione della produzione di idrogeno mediante l'impiego di energia solare; le prove di sonofotolisi sono quindi state condotte con l'ausilio di un trasduttore piezoelettrico da 38 kHz e della sola lampada allo xeno (in virtù delle proprietà spettrali analoghe a quelle dell'emissione solare) e del fotocatalizzatore che ha fornito i migliori risultati ( $\text{LaIn}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_3$ ) con la lampada suddetta.

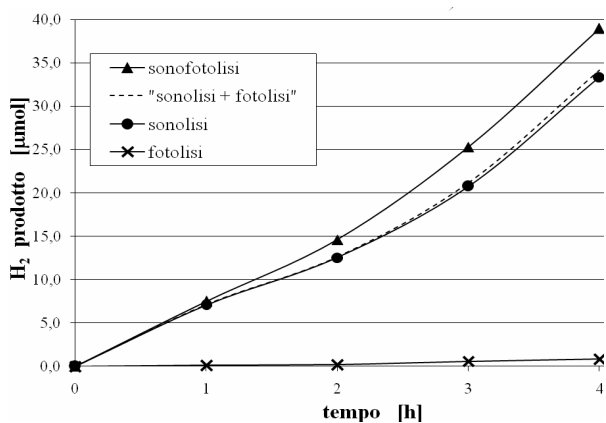


Figura 12: Prove di fotolisi, sonolisi e sonofotolisi catalizzata, realizzate con lampada allo xeno, trasduttore da 38 kHz e catalizzatore  $\text{LaIn}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_3$ .

In figura 12 sono riportati sul medesimo grafico i risultati delle prove di sonolisi, fotolisi e sonofotolisi condotte con la miscela di acqua bidistillata/etanolo ed il fotocatalizzatore  $\text{LaIn}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_3$ . L'analisi dei risultati mostra per la prova di sonofotolisi una produzione di idrogeno maggiore della somma dei contributi della sonolisi e della fotolisi considerati separatamente.

## CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata studiata la produzione di idrogeno dall'acqua mediante processi di sonolisi e fotolisi catalizzata. La produzione di  $\text{H}_2$  mediante processi i suddetti è stata indagata dapprima singolarmente, individuando (nel caso della fotolisi) per ciascuna delle sorgenti luminose impiegate il fotocatalizzatore che fornisce i risultati migliori. Successivamente è stata indagata la produzione di idrogeno mediante l'azione simultanea di ultrasuoni e radiazione luminosa (sonofotolisi) al fine di verificare l'efficacia della combinazione dei due differenti processi di scissione della molecola d'acqua.

Relativamente alla fotolisi, la più alta produzione di idrogeno si ottiene irradiando con la sorgente che emette a partire da 180 nm e con  $\text{La}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{GaO}_3$  come fotocatalizzatore.

Utilizzando sorgenti con spettri di emissione nell'intervallo di lunghezze d'onda maggiori di 310 nm (che meglio simulano lo spettro solare), le produzioni di idrogeno più alte si ottengono con i fotocatalizzatori  $\text{La}_{0.5}\text{InGa}_{0.5}\text{O}_3$  e  $\text{LaIn}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_3$ . Questi due sono infatti i fotocatalizzatori che esibiscono le componenti più batocromiche nello spettro di assorbimento.

Per quanto riguarda le prove di sonofotolisi, queste sono state effettuate impiegando esclusivamente il fotocatalizzatore che ha mostrato la produzione maggiore di idrogeno in combinazione con la lampada allo xeno, poiché l'unico di reale interesse applicativo nella prospettiva di impiego con sistemi di captazione della radiazione solare. I risultati delle prove di sonofotolisi hanno mostrato una effettiva sinergia tra l'effetto sonolitico e fotolitico: l'azione combinata dei due processi mostra infatti un incremento nella produzione dell'idrogeno prodotto, rispetto alla somma dei due singoli effetti considerati separatamente.

I fenomeni indagati presentano interessanti prospettive di sviluppo futuro quali: lo studio del fenomeno sonofotolitico al variare delle condizioni di temperatura, l'introduzione di innovativi sistemi di captazione di idrogeno immersi in acqua, le prestazioni di agenti sacrificali differenti.

## LISTA DEI SIMBOLI

E = energia;  
H = costante di Planck;  
 $\nu$  = frequenza della radiazione;  
 $E(\text{CB})$  = potenziale elettrico della banda di conduzione;  
 $E(\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2)$  = potenziale elettrico della coppia  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ ;  
R = costante universale dei gas;  
T = temperatura;  
F = costante di Faraday;  
pH = cologaritmo dell'attività protonica;  
 $E(\text{VB})$  = potenziale elettrico della banda di valenza;  
 $E(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O})$  = potenziale elettrico della coppia  $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ .

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. H. Harada, Isolation of hydrogen from water and/or artificial seawater by sonophotocatalysis using alternating irradiation method, *International Journal of Hydrogen Energy* 26, pp. 303–307, 2001.
2. P. R. Williams, P. M. Williams, S. W. J. Brown, Cavitation phenomena in water involving the reflection of ultrasound pulses from a free surface, or from flexible membranes, *Phys. Med. Biol.*, 43, pp. 3101–3111, 1998.
3. H. Yanagida, Y. Masubuchi, K. Minagawa, T. Ogata, J. Takimoto, K. Koyama, A reaction kinetics model of water sonolysis in the presence of a spin-trap, *Ultrasonics Sonochemistry* 5, pp. 133–139, 1999.
4. A. Kudo, I. Mikami, Photocatalytic activities and photophysical properties of  $\text{Ga}_{2-x}\text{In}_x\text{O}_3$  solid solution, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 94, pp. 2929-2932, 1998.
5. CeramTec AG, Innovative Ceramic Engineering – Piezo Applications Division: “Piezoceramics”, 2001.
6. G.C. Pimental, A.L. McClellan: “The Hydrogen Bond”, 1960, Freeman, San Francisco.
7. J. R. Bolton, Solar photoproduction of hydrogen: a review, *Solar Energy*, vol. 57, pp. 37-50, 1996.
8. T. Kurz, W. Lauterborn, B. Metten: “Molecular dynamics approach to bubble dynamics and sonoluminescence”, *Physical acoustics – part B*, 17th International Congress on Acoustics, 2-7 settembre 2001, Roma.

**SESSIONE**

**MODELLI DI SIMULAZIONE  
AMBIENTALE**



## **METODOLOGIE DI SUPPORTO AI PROCESSI DECISIONALI FINALIZZATI ALLA VALUTAZIONE AMBIENTALE STRATEGICA DI PIANI E PROGETTI ATTRAVERSO L'UTILIZZO DI MODELLI DI SIMULAZIONE AMBIENTALE**

V. Grippaldi<sup>1</sup>, A.R. Vernaci<sup>2</sup>

<sup>1</sup>, <sup>2</sup>Dipartimento di Arte Scienza e Tecnica del Costruire, Università di Reggio Calabria  
Via Melissari Feo di Vito 89124 Reggio Calabria. Tel. 0965 3223144 Fax 0965 21158  
v.grippaldi@unirc.it, rosanna.vernaci@unirc.it

### **SOMMARIO**

Come conseguenza dei processi di decentramento e dell'obbligatorietà di rispondenza di piani e di programmi agli obiettivi dello sviluppo sostenibile, gli enti locali si trovano a dover affrontare una serie di problemi complessi in campi molto diversi, che richiedono competenze assai vaste ed approfondite e che coinvolgono interessi sia pubblici che privati.

La Valutazione Ambientale Strategica (VAS) diventa uno strumento essenziale per la valutazione della sostenibilità, rilevando quanto i piani sono coerenti, quanto "si è in linea" con gli obiettivi, le strategie e il piano d'azione per uno sviluppo sostenibile.

Le amministrazioni competenti devono possedere una rafforzata e rinnovata capacità di integrare nei processi di pianificazione analisi e indirizzi relativi all'equilibrio strutturale e funzionale del territorio considerato, provvedendo, in alcuni casi, al censimento, alla qualificazione ed alla quantificazione delle risorse ambientali e facendo comune riferimento a sistemi integrati di dati, di fonti e forme assai diverse. L'integrazione di essi necessita di adeguati modelli di elaborazione statistica, in modo da avere risultati scientifici condivisibili dalla maggior parte dei soggetti coinvolti e di una accurata "ingegnerizzazione". Nasce, a questo proposito, l'esigenza di una architettura informatica che aiuta l'utente a prendere decisioni ma senza sostituirsi ad esso.

### **INTRODUZIONE**

In Italia, da qualche anno, si è accelerato il processo di decentramento politico ed operativo che attribuisce agli enti locali crescenti responsabilità decisionali, amministrative, fiscali e di controllo in diversi settori.

Come conseguenza di questi processi di decentramento, gli enti locali si trovano a dover affrontare una serie di problemi complessi in campi molto diversi, che richiedono competenze assai vaste ed approfondite e che coinvolgono interessi sia pubblici che privati. In questo processo viene coinvolta una pluralità di soggetti pubblici e privati, a vari livelli e con diverse funzioni, in quanto detentori di una parte del patrimonio informativo e normativo.

Per fronteggiare le complesse e profonde trasformazioni di ordine economico, sociale ed ambientale, che rendendo sempre più complesso il compito fondamentale di governo del territorio, e le articolate e spesso controverse relazioni tra le diverse funzioni che le amministrazioni territoriali sono chiamate a svolgere, si stanno diffondendo nuove strategie di pianificazione integrata e negoziata tra attori pubblici e privati. Si tratta di nuovi modelli di programmazione e progettazione delle funzioni pubbliche e degli interventi; modelli costruiti attorno a processi più aperti ed efficaci di coordinamento tra tutti i soggetti istituzionali.

Il loro scopo fondamentale è quello di individuare le principali scelte su cui puntare per garantire crescita economica e sostenibilità sociale ed ambientale in un'ottica di medio-lungo periodo. Le amministrazioni sono chiamate a riflettere maggiormente sul futuro del proprio territorio, superando una antica tendenza a sviluppare azioni soltanto a breve termine; sono indotte a costruire percorsi di sviluppo realistici e sostenibili dal punto di vista sociale e soprattutto ambientale.

### **LA PIANIFICAZIONE STRATEGICA**

La pianificazione strategica può essere considerata come un processo attraverso il quale le amministrazioni progettano e programmano lo sviluppo sociale ed economico del territorio e attuano le politiche pubbliche, incorporando, al percorso tradizionale, forme di flessibilità e di coinvolgimento degli attori, atte ad evitare astratte semplificazioni della realtà in visioni troppo deterministiche e dirigistiche.

Il compito della pianificazione strategica è quella di assicurare la programmazione nel medio e lungo termine di azioni che possano garantire al tempo stesso prosperità economica, coesione sociale, sostenibilità ambientale e partecipazione dei cittadini.

Tale strumento si può definire come:

- la costruzione collettiva di una visione condivisa del futuro di un dato territorio, attraverso processi di partecipazione, discussione, ascolto;
- un patto tra amministratori, attori, cittadini, e partner diversi per realizzare tale visione attraverso una strategia e una serie conseguente di progetti, variamente interconnessi, giustificati, valutati e condivisi;
- il coordinamento delle assunzioni di responsabilità dei differenti attori nella realizzazione dei progetti.

Si tratta, quindi, di un metodo che:

- privilegia le analisi prospettiche e di scenario;
- riconduce la complessità e la specificità locale ad un unico disegno strategico;
- opera in una dimensione apertamente pragmatica, consapevole di agire in un contesto di razionalità limitata, e assume di conseguenza un comportamento dinamico e flessibile nei confronti della definizione degli obiettivi e delle azioni;

- si affida a processi di apprendimento e di revisione iterativi;
- promuove la consultazione e la partecipazione allargata degli interessi e della società civile;
- valuta i progetti sulla base della loro coerenza con la strategia generale e di principi di compatibilità urbanistica e di sostenibilità;
- attribuisce rilevanza strategica alle fasi attuative del piano;
- affida ai documenti di piano una funzione eminentemente persuasiva, comunicativa e promozionale(1).

Vengono riassunte di seguito le fasi attraverso le quali si articola un Piano Strategico Territoriale:

1. delimitazione dell'area di riferimento
2. ricostruzione dei programmi in corso o in previsione
3. analisi delle dinamiche di trasformazione del territorio, dell'economia, della società
4. prefigurazione e valutazione di scenari alternativi per lo sviluppo
5. definizione di una visione guida per il futuro
6. individuazione dei progetti e delle azioni prioritarie
7. organizzazione dei patti e dei protocolli di accordo
8. elaborazione dei dispositivi di raccordo con la strumentazione vigente
9. allestimento del sistema di gestione e valutazione del piano

### La sostenibilità ambientale come modello di sviluppo

Per contribuire allo sviluppo sostenibile, alla pianificazione urbanistica e territoriale strategica si richiede una rafforzata e rinnovata capacità di affrontare la tematica del governo delle trasformazioni territoriali, integrando nei processi di pianificazione analisi e indirizzi relativi all'equilibrio strutturale e funzionale del territorio considerato.

Il concetto di sviluppo sostenibile è stato proposto come fondamento della politica economica mondiale per i decenni futuri dal rapporto "Our common future" (Il futuro di noi tutti) presentato nel 1987 dalla World Commission on Environment and Development (1984-1987), meglio noto come Rapporto Brundtland, dal nome della premier norvegese che aveva presieduto la commissione.

Per sviluppo sostenibile si intende "uno sviluppo che soddisfi i bisogni delle generazioni presenti senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri". Questo concetto impone di avere la consapevolezza che le risorse naturali ed essenziali per la vita del genere umano (l'acqua, il suolo, l'energia, le specie vegetali e quelle animali) sono finite, limitate e difficilmente ricostituibili.

Per semplificare, il rapporto prescrive di lasciare a coloro che verranno dopo di noi "un'eredità di ricchezza" intesa come insieme di conoscenze scientifico-tecnologiche, di capitale prodotto dall'uomo e di beni ambientali non inferiore a quella che noi abbiamo ereditato.

Il documento è stato definito "una guida fondamentale per gestire i sistemi globali e per ridurre le tensioni sociali": indica, infatti, una via da percorrere lasciando ad economisti, geografi ed urbanisti il compito di stabilirne le modalità attuative.

Gli obiettivi di sostenibilità sono comunque quelli che soddisfano le seguenti ineludibili condizioni:

- il consumo di una risorsa non rinnovabile deve essere ridotto al minimo;

- una risorsa rinnovabile non può essere sfruttata oltre la sua capacità di rigenerazione;
- si deve rispettare la capacità di carico sull'ambiente, non potendosi immettere in esso più sostanze di quanto l'ambiente riesca ad assorbire;
- i flussi di energia e di materiali devono essere ridotti a livelli tali da generare il minimo dei rischi. (vedi Figura 1)

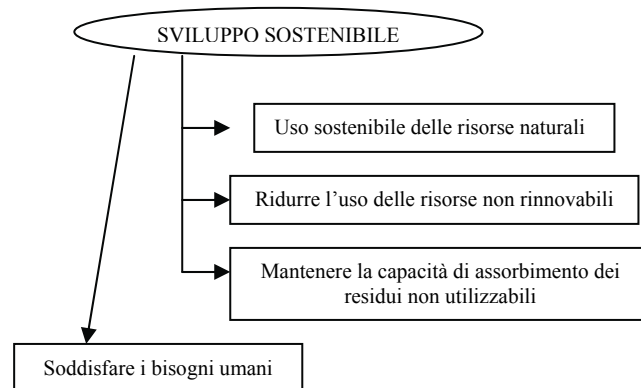


Figura 1: Obiettivi di sostenibilità

La città odierna è il frutto di un'errata concezione di sviluppo che, per lungo tempo, ha posto una stretta correlazione tra crescita economica e qualità della vita, che considerava l'ambiente urbano alla stregua di una "macchina" capace di produrre ricchezza ed occupazione, incurante delle ripercussioni prodotte sull'ambiente e, di conseguenza, sulla salute dei cittadini.

Per superare questa visione semplicistica e riduttiva, oggi si parla di "ecosistema" anche riferendosi all'organismo urbano caratterizzato da relazioni, funzioni, componenti antropiche e non, fattori sociali e culturali, connessione economiche, classi socio-spaziali strettamente interdipendenti ed interagenti fra di loro.

Al pari di quanto accade per gli ecosistemi naturali, anche nel caso degli ecosistemi urbani si può pervenire ad una pianificazione sostenibile solo dalla comprensione del sistema di funzionamento urbano.

La stretta connessione tra stili di vita urbani e problematiche ambientali è stata fortemente ribadita dalla "Carta Europea delle città sostenibili di Aalborg" (1994) che considera la città come principale responsabile degli impatti ambientali. Risparmio energetico, riduzione della mobilità, incentivi al riciclo, pianificazioni accurate, spazi verdi, recupero e rifunzionalizzazione dei simboli identitari costituiscono prerogative essenziali di ogni piano urbano locale secondo la Carta Europea. A tal proposito si riportano i seguenti punti della Carta:

- I.3 Strategie locali per un modello urbano sostenibile
  - Ogni città ha la sua specificità e pertanto occorre che ciascuna trovi la propria via alla sostenibilità. Il loro compito è quello di integrare i principi della sostenibilità nelle rispettive politiche e partire dalle risorse delle diverse città per costruire appropriate strategie locali.
- I.14 Strumenti amministrativi e di gestione urbana per l'attuazione di un modello sostenibile
  - Le città si impegnano ad utilizzare gli strumenti tecnici e politici disponibili per attuare un approccio alla gestione urbana che tenga conto degli ecosistemi.

- Si farà ricorso ad una vasta gamma di strumenti tra i quali quelli necessari per la raccolta e il trattamento dei dati ambientali e la pianificazione ambientale;
- strumenti normativi, economici e di informazione quali direttive, imposte e tasse;
- nonché meccanismi che contribuiscano ad accrescere la consapevolezza dei problemi e prevedano la partecipazione dei cittadini.
- Si cercherà di istituire nuovi sistemi di contabilità ambientale che consentano di gestire le risorse naturali in maniera economica analogamente alla gestione del denaro, risorsa artificiale per eccellenza.

Questi principi in materia di sostenibilità hanno trovato, una loro formale legittimazione anche nel trattato dell'Unione Europea.

La pianificazione concorre quindi a determinare i livelli di qualità urbana in termini di benessere, salubrità, efficienza e sicurezza degli interventi antropici, nonché i livelli accettabili della pressione dei sistemi insediativi e relazionale sull'ambiente naturale.

La complessità di tale operazione risulta subito evidente. Un sistema di pianificazione, di controllo e di gestione, che possa sostenere l'integrazione delle questioni ambientali ai diversi livelli di pianificazione, è da costruire con l'attivazione e l'attuazione di azioni da svilupparsi in molte direzioni, in contemporanea e in reciproca relazione, utilizzando il supporto normativo innovativo. Ciò che viene anzitutto richiesto è un forte impegno di rinnovamento a livello culturale.

Infatti, se il problema ecologico è, anzitutto, "un problema di ethos pubblico", la sua soluzione postula un forte rinnovamento dei modi di operare della comunità politica, delle forme di convivenza e dei valori che ispirano la società civile.

A livello disciplinare, qualità dello sviluppo e sviluppo sostenibile costituiscono, invece, i termini problematici sui quali si misura la rifondazione teorica e operativa di tutte le discipline relative al territorio. Il carattere sistemico del territorio rende necessario il superamento della tradizionale divisione "per compartimenti stagni" delle discipline connesse e l'affinamento di adeguate metodologie di elaborazione e valutazione progettuale, nonché di gestione dell'uso delle risorse, che, nella prospettiva di approccio "transdisciplinare", renda possibile, con l'utilizzazione di un linguaggio comune, una pianificazione che sia il risultato di una logica e di una impostazione disciplinare integrata e sia quindi contemporaneamente una pianificazione urbanistica, territoriale e ambientale.

## LA VALUTAZIONE AMBIENTALE STRATEGICA

Oggi la forte spinta impressa dai principi di sviluppo sostenibile e dai suoi metodi e strumenti applicativi ha spinto l'Unione Europea, già avviata su questa strada dai molteplici trattati comunitari sottoscritti, ad adottare la VAS Valutazione Ambientale Strategica. Scopo della VAS è verificare la rispondenza dei piani e dei programmi agli obiettivi dello sviluppo sostenibile, accertandone la diretta incidenza sulla qualità dell'ambiente.

L'esame della situazione ambientale, rendendo leggibili le pressioni più rilevanti per la qualità ambientale, le emergenze, le aree di criticità, può utilmente indirizzare la definizione di obiettivi, finalità e priorità dal punto di vista ambientale, nonché l'integrazione di tali aspetti nell'ambito della pianificazione generale e di settore.

La Direttiva Europea 2001/42/CE concernente "la valutazione degli effetti di determinanti piani e programmi sull'ambiente naturale", così detta direttiva VAS, si pone come obiettivo quello di garantire un elevato livello di protezione dell'ambiente e individua la Valutazione Ambientale Strategica lo strumento per l'integrazione delle considerazioni ambientali all'atto dell'elaborazione e dell'adozione di piani e programmi al fine di promuovere lo sviluppo sostenibile. L'articolo 3 della direttiva 2001/42/CEE definisce l'ambito di applicazione, affermando che i piani e i programmi che possono avere effetti significativi sull'ambiente, sono soggetti alla valutazione ambientale strategica secondo la procedura contrassegnata dagli articoli da 4 a 9 della stessa direttiva.

La valutazione ambientale strategica è obbligatoriamente effettuata: per tutti i piani e programmi che sono elaborati per i settori agricolo, forestale, della pesca, energetico, industriale, dei trasporti, della gestione dei rifiuti e delle acque, delle telecomunicazioni, turistico, della pianificazione territoriale o della destinazione dei suoli, e che definiscono il quadro di riferimento per l'autorizzazione dei progetti elencati negli allegati I e II della direttiva 85/337/CEE (riguardante la VIA); per tutti i piani e programmi per i quali, in considerazione dei possibili effetti sui siti, si ritiene necessaria una valutazione ai sensi degli articoli 6 e 7 della direttiva 92/43/CEE (relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali).

Le analisi da condurre a supporto della sostenibilità ambientale individuano e definiscono le "capacità di carico", ovvero le soglie qualitative e quantitative per i differenti usi delle risorse, mentre gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistici organizzano e "gestiscono" tale capacità di carico distribuendola sul territorio.

Si consideri comunque che il corretto svolgimento della procedura di valutazione ambientale strategica, impone, in sede di elaborazione del piano, tre domande fondamentali:

- quali criticità rappresentano situazioni di forte rischio o assumono relativa maggiore rilevanza e dunque vanno considerate con particolare attenzione in sede di pianificazione?
- quali sono i principali fattori che nel contesto territoriale di riferimento determinano, da soli o insieme con effetti cumulativi, le criticità ambientali?
- quali scelte di pianificazione possono influire positivamente su tali fattori allo scopo di eliminare/contenere le criticità ambientali, ridurre le pressioni dei settori produttivi, migliorare lo stato di qualità? (2)

Queste domande devono essere sostanzialmente riportate nel rapporto ambientale, che integra il piano urbanistico e lo accompagna nella fase di approvazione e di realizzazione e che deve essere predisposto obbligatoriamente ai sensi dell'art. 5 della direttiva 2001/42. Nel contesto della procedura di valutazione ambientale strategica notevole rilievo assumono le attività rivolte a garantire la massima informazione e partecipazione dei soggetti interessati.

In altri termini, la VAS "è volta ad individuare preventivamente gli effetti che deriveranno dall'attuazione delle singole scelte di piano e consente, di conseguenza di selezionare tra le possibili soluzioni alternative quelle maggiormente rispondenti ai predetti obiettivi generali del piano. Nel contempo individua le misure di pianificazione volte ad impedire, mitigare o compensare l'incremento delle eventuali criticità ambientali e territoriali già presenti e i potenziali impatti negativi delle scelte operate. La valutazione di sostenibilità ambientale e territoriale per essere efficace

deve svolgersi come un processo iterativo, da effettuare durante l'intero percorso di elaborazione del piano" (ad es., Piano d'Azione Locale – Agenda 21).

### Procedura di Valutazione Ambientale Strategica per gli strumenti di pianificazione

La procedura da mettere in atto nell'ambito della VAS si articola attraverso le seguenti fasi temporali:

#### Fase 1: analisi della situazione ambientale

Si individuano e si presentano le informazioni sullo stato dell'ambiente e delle risorse naturali nell'ambito territoriale di riferimento del piano, nonché le informazioni sulle interazioni positive e negative tra queste e i principali settori di sviluppo;

Si effettua una previsione della probabile evoluzione dell'ambiente e del territorio senza gli effetti del piano.

#### Fase 2: obiettivi, finalità e priorità

Si individuano obiettivi, finalità e priorità in materia di sviluppo sostenibile da conseguire con il piano;

#### Fase 3: bozza di piano e individuazione delle alternative

Si predispongono la bozza di piano evidenziando le priorità ambientali e gli obiettivi di sviluppo.

Si verificano le diverse possibili alternative e ipotesi localizzative in funzione degli obiettivi di sviluppo e di sostenibilità ambientale, evidenziando le ragioni e i criteri che ne hanno sostenuto le scelte.

FASE DELLA VAS
1. Valutazione della situazione ambientale elaborazione di dati di riferimento
2. Obiettivi, finalità e priorità
3. Bozza di proposta di sviluppo (piano/programma) e individuazione delle alternative
4. Valutazione ambientale della bozza di proposta
5. Indicatori in campo ambientale
6. Integrazione dei risultati della valutazione nella decisione definitiva in merito ai piani e ai programmi

Figura 2: Fasi della VAS

#### Fase 4: Valutazione ambientale della bozza

Si valutano le implicazioni e le conseguenze sull'ambiente degli obiettivi di sviluppo previste nella bozza di piano.

Si analizza in quale misura la strategia definita nella bozza agevoli o ostacoli lo sviluppo sostenibile del territorio interessato.

Si esamina la bozza di piano alla luce della sua conformità alle politiche e alla legislazione regionale, nazionale e comunitaria in campo ambientale.

#### Fase 5: Verifica degli effetti

Si valutano i risultati prestazionali attesi, utilizzando a tal fine indicatori ambientali (descrittori di performance, di efficienza, di sostenibilità) intesi a quantificare e semplificare le informazioni in modo da agevolare, sia da parte del responsabile delle decisioni che da parte del pubblico, la

comprensione delle interazioni tra l'ambiente e i problemi chiave del settore.

Fase 6: Integrazione dei risultati della valutazione nella decisione definitiva sul piano

Si predispongono la versione definitiva del piano tenendo conto dei risultati della valutazione. A seguito dell'attività di controllo e valutazione degli effetti indotti dall'attuazione del Piano, è opportuno elaborare bilanci periodici sull'attuazione stessa, allo scopo di proporre azioni correttive attraverso procedure di revisione del Piano. (3)(vedi Figura 2)

### La conoscenza dei sistemi territoriali ambientali

Per l'elaborazione degli strumenti di pianificazione urbanistica e territoriale, il ricorso a equipe multidisciplinari in cui siano presenti anche le competenze giuridiche, storiche, paesaggistiche ed agronomiche forestali, oltre che quelle geologiche, diventa raccomandabile.

Uno dei problemi che richiede immediata e particolare attenzione è quello relativo alla conoscenza dei sistemi territoriali-ambientali. "le scelte operate vengono elaborate sulla base della conoscenza, sistematicamente acquisita, dei caratteri fisici, morfologici ed ambientali del territorio, delle risorse, dei valori e dei vincoli territoriali anche di natura archeologica, delle utilizzazioni in corso, dello stato della pianificazione in atto, delle previsioni dell'andamento demografico e migratorio, nonché delle dinamiche delle trasformazioni economico sociali, definite sia attraverso la comparazione dei valori e degli interessi coinvolti, sia sulla base del principio generale della sostenibilità ambientale dello sviluppo". Conoscere, interpretare, valutare e governare costituiscono le azioni principali della pianificazione. Un corretto approccio metodologico alla programmazione e alla pianificazione del territorio deve fondarsi su una strettissima correlazione tra questi diversi momenti. Il fine non è quello della descrizione più obiettiva possibile della realtà, ma quello della costruzione del modello interpretativo del reale in chiave sistemica e secondo una dinamica storico-evolutiva. Le basi conoscitive devono riguardare necessariamente le componenti che caratterizzano il sistema insediativo, il sistema relazionale e il sistema naturalistico ambientale ed agroforestale, con le relative risorse ed i relativi rischi.

Le informazioni da acquisire su tutti questi aspetti sono ovviamente numerosissime ed il problema è quello di selezionare quelle essenziali, la gran parte delle quali dovrà essere tradotta in elaborati cartografici. Il modello di riferimento per l'organizzazione dei dati è quello DPSIR, definito dall'Agenzia Europea per l'Ambiente, basato sulla rilevazione degli elementi di pressione antropica ed il conseguente impatto ambientale, la valutazione dello stato delle principali risorse (suolo, acqua, aria, energia, ..), la definizione delle politiche di tutela e difesa ambientale con i relativi investimenti finanziari.(vedi Figura 3)

Su tali basi informative si applicano strumenti di analisi che correlano fra loro i vari elementi, descrivono i diversi scenari, effettuano simulazioni su risultati delle politiche di intervento utilizzando modelli descrittivi ed interpretativi, al fine di valutare ad esempio la localizzazione di un impianto o di un intervento pubblico, le potenzialità di sviluppo di un'area, le migliori destinazioni di uso o di vincolo sul suolo, l'impatto ambientale di un'opera.

In alcuni casi, le amministrazioni competenti devono provvedere al censimento, alla qualificazione ed alla quantificazione delle risorse per ottemperare al loro mandato di pianificazione e di sviluppo di interventi; facendo comune

riferimento a sistemi integrati di dati, di fonti e forme assai diverse, per cui l'integrazione di essi necessita di adeguati modelli di elaborazione statistica, in modo da avere risultati scientifici condivisibili dalla maggior parte dei soggetti coinvolti. Il processo di istruzione del problema, necessita di una accurata "ingegnerizzazione" che permetta ai diversi attori di inserirsi in modo tempestivo ed adeguato e che, nello stesso tempo, consenta a ciascuno degli interessati di verificare le scelte, i percorsi, gli stadi di attuazione e di realizzazione.

In virtù di tale necessità, nasce l'esigenza- di una architettura informatica che aiuti l'utente a prendere decisioni ma senza sostituirsi ad esso e definita "sistema di supporto alle decisioni".



Figura 3: Modello DPSIR

## CARATTERISTICHE E PRESTAZIONI DI UN SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI

Un sistema di supporto alle decisioni (*Decision Support System, DSS*) è uno strumento che permette di condividere ed utilizzare dati e informazioni descrittivi fenomeni di tipo culturale, sociale, economico e ambientale. Tale strumento viene costruito con specifico riferimento a basi territoriali di dimensione locale e può essere di volta in volta indirizzato all'inquadramento, alla definizione, alla gestione ed al controllo dei processi decisionali ed attuativi pertinenti alle autorità locali ed ai diversi attori dei relativi Piani strategici.

Il principale scopo di un DSS è quello di permettere di estrarre, in tempi brevi e in modo flessibile, da una grossa mole di dati le informazioni che servono a supportare e migliorare in termini di efficacia il processo decisionale.

L'informazione è un bene necessario per pianificare e controllare le attività produttive: costituisce la materia prima che viene trasformata dai sistemi informativi. I sistemi di supporto alle decisioni nascono dall'enorme accumulo di dati registrati nell'ultimo ventennio, e dalla pressante richiesta di utilizzo di tali dati per scopi che superano quelli, di routine, legati all'elaborazione giornaliera. I DSS aiutano il decisore umano sia nelle decisioni operative, che nelle decisioni strategiche, a più lungo termine ed a più ampio respiro.

I processi decisionali possono essere classificati in quattro macrocategorie:

- pianificazione strategica (stabilire politiche, fissare obiettivi, selezionare risorse, etc.)
- controllo gestionale (assicurare efficacia nella acquisizione e uso delle risorse)
- controllo operativo (assicurare efficacia nello svolgimento delle operazioni)

- processo operativo (scelta di nuove strategie all'evolversi della fase operativa scaturita dal processo decisionale)

Caratteristica comune ai diversi ambiti decisionali è la necessità di strumenti di archiviazione e di interrogazione, per ottenere, dall'enorme quantità di dati contenuti nei database o resi disponibili da Internet:

- informazioni di sintesi che permettano la valutazione di un fenomeno
  - la scoperta di correlazioni significative
- l'acquisizione di conoscenza utile a stabilire una strategia decisionale

Il DSS, attraverso procedure interattive, fornisce al decisore:

- la disponibilità di tutte le informazioni necessarie per la comprensione del problema
- la possibilità di esplorare i dati secondo diversi punti di vista, in base alle esigenze dello stesso utente
- la possibilità di valutare gli scenari conseguenti alle scelte compiute

La creazione di un DSS deve inoltre rispondere a requisiti specifici legati alle caratteristiche dei processi decisionali e alle necessità dell'utente:

- nel processo decisionale, l'esistenza di vari tipi di decisioni, e di vari tipi di dati che prevedono distinte modalità di elaborazione, implica che il DSS debba essere flessibile
- devono essere permesse analisi ad hoc sui dati e l'uso di diversi modelli (quantitativi, statistici, etc.)

Il processo prevede in input "dati grezzi" e fornisce in output informazioni utili ottenute attraverso le fasi di:

- Selezione
- Preprocessing
- Trasformazione dei dati
- Interpretazione e valutazione

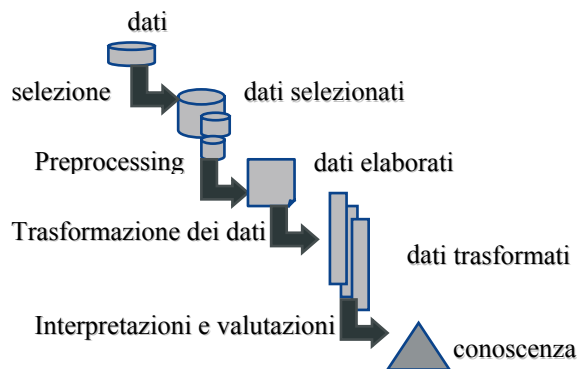


Figura 4: Processo del DSS

In generale, la ricerca in questo settore ha come obiettivo primario quello di costruire delle applicazioni capaci di fornire informazioni, relative agli aspetti demografici, sociali, ambientali e culturali, facilmente rielaborabili ai fini della programmazione.

### Strumento di supporto

Il GIS risulta essere lo strumento di supporto alle attività decisionali mediante l'analisi dei dati spaziali che devono essere organizzati in modo da rispondere alle domande che si porranno al sistema.

Pensiamo ad esempio a come archiviare le strade: se siamo interessati al traffico, alle distanze, ai percorsi ottimali ecco che le strade dovranno essere memorizzate come linee e nodi, in modo da costituire un grafo stradale; se invece si vuole

monitorare lo stato del manto stradale è necessario memorizzarle come superfici.

I dati sono quindi un elemento fondamentale per il corretto utilizzo di un GIS. E' molto importante che essi siano organizzati in una o più tabelle dati (database) secondo criteri che ne facilitino la consultazione e che venga utilizzato un opportuno gestore di base dati (DBMS: Data Base Management System) il quale permetta l'archiviazione, la manipolazione e il recupero dei dati stessi.

Affinché vengano prodotti gli indicatori prima descritti è necessario mettere in relazione due o più database e informazioni di tipo grafico con informazioni di tipo numerico rappresentate generalmente in modo tabellare.

Voglio sapere, ad esempio, quanti residenti ci sono in un determinato edificio: la tabella associata all'edificio deve avere come chiave primaria un valore alfanumerico che identifica univocamente via, civico ed esponente; la tabella dei residenti dovrà avere un campo dello stesso tipo, che non potrà essere chiave primaria in quanto più di un residente avrà lo stesso valore in questo attributo, ma che permetterà di creare la relazione necessaria fra i due archivi.

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha inteso presentare un metodo implementabile, basato su dati reperibili e standardizzati, che portasse ad una pianificazione del territorio più omogenea possibile, non legata a interpretazioni soggettive di norme alle volte di non immediata applicazione.

Sulla base di quanto discusso si ritiene inevitabile l'utilizzo dei sistemi GIS per la gestione delle tematiche ambientali in tutti gli Enti di controllo e di governo del territorio (Comuni, Province, ARPA). Infatti l'archiviazione e l'elaborazione di numerosi dati territoriali e la loro rappresentazione su base cartografica per un "rendering" immediato e di facile lettura diventa al giorno d'oggi necessario per un'agevole pianificazione territoriale e per ridurre il numero di piani giudicati non conformi in sede di esame istruttorio Regionale.

Sia il Professionista che il Personale degli Uffici Tecnici/Territoriali dei Comuni manifesta non poche difficoltà nella redazione dei Piani. Difficoltà incontrate sia nella fase di

raccolta dei dati e delle informazioni necessarie, a causa della elevata variabilità dei parametri in gioco (di natura urbanistica, statistica, naturale, antropica, ecc), sia nella fase decisionale dove si deve tenere conto anche di specifici vincoli da applicare.

In quanto strumento di supporto decisionale ai Tecnici Competenti, ai quali è demandata operativamente la pianificazione, l'interfaccia utente deve essere progettata con una struttura molto semplice, allo scopo di facilitare la diffusione e di accelerare i processi di pianificazione strategica.

Avvalersi delle tecnologie GIS, può costituire un supporto efficace per la programmazione territoriale in quanto rende più intuitive e semplificate le procedure di confronto tra i dati spaziali.

Risulta chiaro da quanto detto che la prima esigenza di chi avvia un proprio GIS sia quella di dotarsi di dati geografici pertinenti, ma è anche evidente che questi dati dovranno poi essere utilizzati, ovvero resi disponibili per quelle elaborazioni tematiche, di analisi spaziale, di simulazione che costituiscono in effetti lo scopo ultimo di un sistema GIS.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. I.R. Camagni e D. Mazzonis, Verso un Piano Strategico per Roma, Alinea, Firenze, 2002
2. Linee guida per la valutazione ambientale strategica (Vas) Fondi strutturali 2000-2006 Supplemento al mensile del Ministero dell'Ambiente, *l'ambiente informa* n. 9 - 1999 pp. 4-8
3. Regione Calabria Assessorato Urbanistica linee guida per l'applicazione della L.R. 16 aprile 2002 n. 19 "norme per la tutela, governo ed uso del territorio"
4. Angelo Tanese, Emiliano De Filippo, Ruth Rennie, La pianificazione strategica per lo sviluppo dei territori, Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2006 pp. 7-9, 11-12, 18.
5. G. Arampatzis et al. European Journal of Operation Research 152 (2004)
6. APAT, VAS Quadro di riferimento legislativo a livello comunitario e regionale, 2005.

## VALUTAZIONE D'IMPATTO AMBIENTALE PER RILASCI DI EFFLUENTI RADIOCHIMICI TRAMITE ANALISI DI TECNICHE E MODELLI DI PREVISIONE

Rosaria Ippolito<sup>1</sup>, Carmelina Salierno<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Università di Roma “La Sapienza”- Dottorato di Ricerca in Energetica - Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia, Corso Vittorio Emanuele II, 244 - 00186 Roma; e-mail: rosaria.ippolito@uniroma1.it

<sup>2</sup> APAT (Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici) – Dipartimento Rischio Nucleare Tecnologico e Industriale, Via V. Brancati 48 - 00144 Roma; e-mail: carmelina.salierno@apat.it

### SOMMARIO

La normativa italiana, disciplina le attività per il trattamento e la gestione di effluenti radioattivi, le modalità di limitazione del loro rilascio nell’ambiente ed le analisi dell’inquinamento da essi prodotto. Il controllo avviene attraverso la rete di sorveglianza ambientale, verificata ed approvata da APAT, cui spetta il compito di esaminare le principali vie critiche della radioattività nell’ambiente e sulle catene alimentari, acquisire dati di riferimento da utilizzare in situazioni anomale, confermare o eventualmente modificare quanto previsto dai modelli di calcolo impiegati per le valutazioni delle concentrazioni nelle matrici ambientali e dosi, ai gruppi critici, conseguenti a rilasci radioattivi effettuati.

L’obiettivo della ricerca è quello di individuare, attraverso modelli matematici dinamici, scenari tipici caratterizzanti aree interessate da installazioni industriali e nucleari. L’attenzione è rivolta in particolare a queste ultime, sedi di raccolta e trattamento di rifiuti nucleari, e ai relativi rilasci liquidi e gassosi, di tipo cronico e/o accidentale, in acque superficiali ed atmosfera. La caratterizzazione dell’area su cui insiste l’impianto, ambiente costruito, popolazione e vocazione del territorio, contribuisce all’analisi puntuale e permette di valutare e prevenire il rischio da fonti di radiazioni ionizzanti.

### SORVEGLIANZA AMBIENTALE E NORMATIVA

L’esercizio degli impianti industriali e quindi anche degli impianti nucleari (così come definiti dall’art 7 del 230 e smi) comporta un rilascio verso l’ambiente esterno sia di effluenti liquidi che di effluenti aeriformi derivanti dall’“esercizio” dell’impianto stesso.

Per quanto attiene agli impianti nucleari, il rilascio nell’ambiente di effluenti radioattivi è preventivamente autorizzato dal Ministero dello Sviluppo Economico nell’ambito della Licenza di Esercizio; l’autorizzazione delle “formule di scarico” è funzione delle effettive necessità dell’impianto nonché della ricettività ambientale del sito intesa come grado di accettabilità del corpo recettore tenendo conto delle vie di ritorno all’uomo attraverso la catena alimentare.

Ciò comporta la valutazioni preventiva dell’impatto ambientale dovuta all’immissione di radionuclidi nell’ambiente esterno inteso sia come impatto sulle matrici ambientali sia sulla popolazione tenendo conto di differenti vie di esposizione.

Gli effetti derivanti dall’immissione degli effluenti radioattivi, sia liquidi sia aeriformi, nell’ambiente sono monitorati grazie ad un programma di sorveglianza ambientale il cui obbligo viene sancito dalla normativa specifica in materia di protezione dalle radiazioni ionizzanti.

In particolare, la sorveglianza ambientale per gli scarichi radioattivi, è regolata dalla seguente normativa:

decreto legislativo 230/1995

decreto legislativo 241/2000

decreto legislativo 257/2001

Legge 1860/1962

Gli art 54 e 104 del 230, nello specifico, evidenziano gli obblighi e le responsabilità degli esercenti e degli enti preposti al controllo, siano essi regionali (ARPA) o nazionali (APAT).

### CRITERI DI SORVEGLIANZA AMBIENTALE

L’obiettivo primario di un programma di sorveglianza ambientale è quello di valutare il rischio reale o potenziale dell’uomo legato alla presenza di sostanze radioattive nell’ambiente in cui vive principalmente in termini di dose totale, intesa come somma di dose efficace derivante da esposizione esterna e dose impegnata derivante da inalazione e da ingestione di matrici alimentari.

Un radionuclide introdotto nell’ambiente, sia esso in forma liquida che aeriforme, segue numerose e complesse vie attraverso cui può causare esposizione indebita all’uomo.

Di regola, dipendentemente dalla tipologia dell’impianto, non è sempre necessaria una valutazione dettagliata di tutti i radionuclidi presenti oppure di tutte le matrici e le vie di introduzione; infatti, studi mirati, hanno evidenziato che esistono radionuclidi e vie di esposizioni più rilevanti, rispetto ad altri, ai fini della determinazione del rischio. Si definiscono, di conseguenza, i “radionuclidi critici” associati ad una via di esposizione critica nonché a matrici critiche (iodio 131 nell’erba da pascolo e successiva ingestione di latte da parte di bambini).

Allo stesso modo viene individuato un gruppo critico della popolazione, un nucleo di persone, cioè, più o meno numeroso ed eterogeneo, le cui caratteristiche, di tipo sociale e comportamentale, sono tali da renderli maggiormente sensibili alla presenza di radionuclidi nell’ambiente in cui vivono.

### RETI DI SORVEGLIANZA AMBIENTALE

Per soddisfare i criteri di sorveglianza ambientale sono state predisposte le Reti di Sorveglianza a livello sia locale che nazionale le quali, con specifici e dettagliati programmi,

valutano l'impatto radiologico sull'ambiente nell'accezione più ampia del termine.

Le reti di sorveglianza si articolano in maniera complessa intorno all'impianto dipendentemente dai seguenti fattori:

- tipologia dell'impianto;
- radionuclidi principali, loro forma chimico-fisica, vie di scarico;
- caratteristiche idrogeologiche e climatiche del sito;
- comportamento dei radionuclidi nell'ambiente;
- abitudini della popolazione e utilizzo dei prodotti locali
- principali vie di esposizione.

Queste ultime possono risultare numerose e intricate in relazione alla tipologia e forma dei radionuclidi, alle modalità di scarico ed abitudini dei gruppi critici.

Lo smaltimento di sostanze radioattive può avvenire, infatti, secondo differenti modalità comprendenti scarichi liquidi in corsi d'acqua (fiumi, laghi, mare etc) o nel terreno, scarichi in atmosfera di particolati, vapori e/o polveri.

Per lo smaltimento in atmosfera le vie di esposizione probabili sono:

- Irraggiamento esterno per immersione nella nube o per esposizione dal terreno su cui sono depositati i radionuclidi;
- inalazione diretta o per risospensione;
- ingestione di prodotti contaminati direttamente oppure rientranti nella catena alimentare.

Per la contaminazione dei liquidi si devono considerare:

- irraggiamento esterno;
- inalazione di vapori;
- ingestione di prodotti diretta e indiretta.

Per la contaminazione del suolo si valutano:

- esposizione esterna;
- inalazione per risospensione di polveri;
- ingestione di matrici contaminate in modo diretto e indiretto.

La rete di sorveglianza ambientale dovrà generalmente prevedere:

- misure di esposizione esterna
- misure di esposizione interna
- valutazione delle concentrazioni del particolato atmosferico
- concentrazioni dei radionuclidi nelle matrici alimentari ed ambientali.

La periodicità, la localizzazione dei punti di campionamento e il loro numero saranno stabiliti in base a vari fattori quali natura ed entità degli scarichi, condizioni idrogeologiche del sito, condizioni meteorologiche, distribuzione dei gruppi critici intorno al sito etc..

## **OBBLIGHI DELL'ESERCENTE**

Gli obblighi dettati dall'art 54 sono affidati al possessore della licenza e/o all'esercente il quale:

- predisporre un adeguato programma di sorveglianza ambientale;
- predisporre mezzi, strumentazione e personale qualificato per l'attuazione dello stesso;
- assicurare l'utilizzo di metodologie di valutazione e misura opportunamente validate;
- revisiona periodicamente il programma stesso in relazione alle mutate caratteristiche dell'impianto, della situazione al contorno e/o dei riferimenti normativi.

## **COMPITI DELL'AUTORITÀ DI CONTROLLO**

L'APAT, così come meglio specificato nel DPR 207/2002 nelle note all'art 2 lettera L, ha il compito di approvare il programma di monitoraggio ambientale proposto dall'esercente, introducendo, laddove necessario, delle proposte e/o delle prescrizioni e di vigilare sulla corretta attuazione del programma stesso.

La vigilanza viene messa in atto attraverso:

- la verifica dei risultati riportati nel rapporto di sorveglianza ambientale che l'esercente trasmette annualmente ad APAT;
- verifica delle tecniche e della strumentazione utilizzate
- vigilanza sulle modalità di campionamento e di misura;
- l'introduzione, quando opportuno, di controlli aggiuntivi;
- la verifica indipendente con l'ausilio di misure di laboratorio oppure tramite l'utilizzo di codici di calcolo dedicati.

## **METODOLOGIE**

La valutazione d'impatto ambientale e radiologico è stata fatta utilizzando il software FRAMES sviluppato dai Pacific Northwest National Laboratories valido sia per rilasci continui sia per quelli impulsivi modellizzato in base alle caratteristiche socio-economiche e meteorologiche del sito.

Il FRAMES nasce dall'esigenza dell'U.S. Environmental Protection Agency di rispondere alle direttive sulla protezione ambientale emanate dal Department Of Energy; sulla base di queste necessità l'EPA ha sviluppato e supportato un programma per la valutazione del rischio radiologico che da una parte integrasse i differenti modelli a supporto delle attività di regolamentazione del DOE tramite un metodo scientifico e dall'altra implementasse lo stesso metodo per utilizzarlo come strumento di valutazione, analisi e regolamentazione.

In realtà il software usato come modello di previsione, non è un codice di calcolo ma un framework cioè un software di supporto e di raccordo per differenti tipologie e modelli di simulazione; il sistema consente la valutazione dell'impatto ambientale e della dose alla popolazione dovuta alla dispersione di contaminanti sia chimici sia radioattivi; Il FRAMES è l'interfaccia grafica del codice di calcolo GENII 2.0 il cui approccio è di tipo stocastico e implementa la metodologia di calcolo Sensitivity Uncertainty Multimedia Modelling Module. Il codice GENII 2.0 implementa i modelli dosimetrici dell'ICRP 26, 30, 48, 56 e 72 con fattori di dose da irraggiamento del Federal Guidance Report 12 e 13 ed inoltre utilizza i fattori di rischio calcolati dall'EPA.

Gli ambienti di dispersione considerati dal simulatore sono l'atmosfera, le acque superficiali, con riferimento a fiumi, mari e laghi, e le acque profonde.

Il software consente di valutare l'impatto sui differenti gruppi critici della popolazione sia per rilasci programmati sia per rilasci impulsivi.

Le vie di esposizione diretta sono l'acqua, il suolo, l'aria, l'inalazione e l'ingestione; inoltre per il tritio viene sempre considerato un modello di assorbimento attraverso la pelle.

Sono possibili 4 modelli atmosferici indipendenti, un modello per le acque superficiali, tre modelli di accumulo

ambientali indipendenti, un modulo di esposizione ed uno di valutazione della dose e del rischio.

Il software racchiude diversi algoritmi di calcolo riguardanti i rilasci liquidi ed aeriformi, che esplicitano modelli di diffusione, trasporto, deposito, diminuzione e decadimento dei radionuclidi nella biosfera.

Per i rilasci aeriformi, il framework utilizza la soluzione gaussiana dell'equazione di diffusione, che prevede due modelli per i quali è possibile scegliere se le valutazioni devono essere fatte per rilasci continui o impulsivi:

- pennacchio gaussiano
- soffio lagrangiano

### Calcolo delle concentrazioni gassose con il modello del pennacchio gaussiano

La concentrazione d'inquinante deducibile con il modello del pennacchio gaussiano è data dalla seguente equazione:

$$C_{Ai(x,y,z,h)} = \frac{Q_i}{2 \cdot \pi \cdot U(h_s) \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2} \cdot G(z)$$

dove:

CA,i = concentrazione ad una distanza sottovento x, trasversale y e altezza z, in un pennacchio con altezza effettiva h, .

Qi = portata di emissione del radionuclide i.

U(hs) = velocità media del vento alla quota di emissione.

$\sigma_y, \sigma_z$  = deviazione standard della distribuzione verticale e orizzontale della concentrazione (coefficiente di diffusione, funzione di x)

G(z) = fattore verticale di dispersione

Il fattore verticale di dispersione include la riflessione del pennacchio sopra la superficie del terreno e lo strato di miscelazione:

$$G(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{2nH+h-z}{\sigma_z} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{2nH-h-z}{\sigma_z} \right)^2} \right)$$

dove:

h = altezza effettiva del rilascio (= hs + risalita del pennacchio)

H = spessore dello strato di miscelazione

Questo modello è idoneo per determinare le concentrazioni dei rilasci di breve durata.

### Calcolo delle concentrazioni gassose con il modello del soffio lagrangiano

Nei modelli lagrangiani del soffio il calcolo delle concentrazioni avviene in due fasi: una prima riguarda il calcolo della concentrazione del soffio a partire dal suo centro, la seconda è il calcolo delle concentrazioni ad un punto fisso nel dominio del modello.

La concentrazione per tale modello è:

$$C_{Ai(r,z,t)} = \frac{Q_i(t_0,t)}{(2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_r^2 \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{r}{\sigma_r} \right)^2} \cdot G(z)$$

Dove:

CA,i = concentrazione ad una distanza r dal centro del soffio ed ad una altezza z dalla superficie del suolo ed al tempo t,  $\left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ .

Qi (t0,t) = attività del radionuclide i liberato al tempo t0 e corretto al tempo t per la diminuzione e il decadimento  $[Bq]$ .

$\sigma_r$  = coefficiente di diffusione radiale  $[m]$

G(z) = fattore verticale di dispersione (uguale a quello visto nel modello del pennacchi lagrangiano)

Altri parametri che influenzano le concentrazioni in atmosfera sono: altezza efficace del rilascio, profilo del vento, coefficiente di diffusione e decadimento radioattivo.

### Calcolo delle concentrazioni liquide

I modelli di dispersione in corsi d'acqua superficiale consentono di determinare le concentrazioni dovute a rilasci continui, impulsivi ed accidentali.

Per la modellazione dei rilasci di radionuclidi nei fiumi o nei laghi, il software determina le concentrazioni ipotizzando profondità costante, velocità costante lungo la costa, alveo diritto, coefficiente di dispersione laterale costante e larghezza del fiume costante. Il punto di rilascio presunto è quello vicino la sponda del fiume, mentre il punto in cui viene calcolata la concentrazione si trova ad una distanza longitudinale x ed una trasversale y.

Quindi la concentrazione nell'acqua dei fiumi ad una posizione sotto corrente è data dall'equazione:

$$C_{w,i} = \frac{Q_b \cdot C_{0,i}}{u \cdot d \cdot B} \cdot \left\{ 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[ e^{-\left( \frac{u \cdot \pi}{u \cdot d \cdot B} \right)^2 \cdot E_y \cdot u \cdot d^2 \cdot x} \right] \cos \left( \frac{n \cdot \pi \cdot y}{B} \right) \right\}$$

dove:

Cw,i = concentrazione nell'acqua di fiume del radionuclide i-esimo ad una posizione w sotto corrente dopo il rilascio continuo per un dato periodo di tempo  $\left[ \frac{Bq}{L} \right]$ .

B = larghezza del fiume  $[m]$

C0,i = concentrazione iniziale del radionuclide i-esimo al momento dello scarico nel fiume  $\left[ \frac{Bq}{L} \right]$

d = profondità del fiume  $[m]$

Ey = coefficiente di dispersione laterale turbolenta  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

Qb = portata dello scarico nel corpo del fiume  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$

u = velocità media del flusso  $\left[ \frac{m}{s} \right]$

x = distanza longitudinale (sotto corrente) della posizione di interesse  $[m]$

y = distanza trasversale (sotto corrente) della posizione di interesse  $[m]$

Quando la posizione di interesse si trova lontano dal punto di immissione dello scarico e la miscelazione laterale si può ritenere completa (modello del flusso di diluizione), la concentrazione nell'acqua si può ricavare dal volume di diluizione del fiume come segue:

$$C_{w,i} = \frac{Q_{w,i}}{V_w}$$

Dove:

$Q_{w,i}$  = tasso di scarico medio del radionuclide  $i$ -esimo nel corpo del fiume  $\left[ \frac{Bq}{s} \right]$

$V_w$  = portata del fiume  $\left[ \frac{L}{s} \right]$

### STUDIO SPERIMENTALE

Il caso studio riportato di seguito, è relativo ad un'area su cui insistono varie tipologie di "impianti nucleari":

- reattori di ricerca
- depositi sottocritici
- laboratori per studi post irraggiamento
- macchine radiogene
- impianti di trattamento e condizionamento di rifiuti solidi e liquidi.

Il software FRAMES-GENII, nel caso specifico, analizza l'impatto ambientale derivante dall'impegno del 100% delle formule attualmente autorizzate, per i rilasci aeriformi ed liquidi. In seguito, viene rappresentata la simulazione d'impatto ambientale per rilasci aeriformi cronici del sito in questione: da notare come nel lay-out (Fig. 1) sono evidenziate due sorgenti (user\_defined 1 e 2) di emissione radiogena, costituiti dai due camini d'espulsione dell'impianto. Altro elemento importante a caratterizzare la simulazione è il file meteorologico (Fig. 2), grazie al quale si modellizzano le condizioni ambientali in base a reali dati storici.

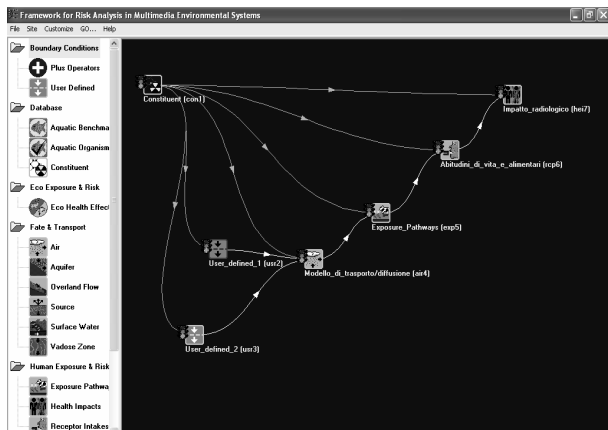


Figura 1 – Modellizzazione del caso studio per rilasci aeriformi

air4 - GENII Chronic Plume Model

Radial Grid Definition | Model Parameters | Default Parameters | Meteorological Files |

Unit: m Ref: 0

16 Sectors in radial grid  
 36 Sectors in radial grid

Please fill in all radial distances. Distances are required to be entered in ascending order.

Distance	Value
1	1000.0
2	1050.0
3	1100.0
4	1150.0
5	1200.0
6	1250.0
7	1300.0
8	1350.0
9	1400.0
10	1450.0

Figura 2 – Dati di Input sui modelli di trasporto e diffusione

Figura 3 – Modellizzazione delle attitudini socio-alimentari

Organ	Constituent	Pathway	Route	Ring	Sector	Health Impact (Sv)	X (km)	Y (km)	End Age	Risk Unit
-	CS137	Air	external	1	1	1.71e-05				
-		Pathway: Air				6.32e-08				
-		Pathway: Fruit				1.91e-07				
-		Pathway: Grain				2.29e-07				
-		Pathway: Ground				3.70e-06				
-		Route: external				9.70e-06				
-		Ring: 1				9.70e-06				
-		Se...				9.70e-06				
-		Pathway: Indoor air				7.48e-08				
-		Pathway: Leafy vegetables				1.76e-06				
-		Pathway: Meat				4.98e-06				
-		Route: ingestion				4.98e-06				
-		Ring: 1				4.98e-06				
-		Se...				4.98e-06				
-						-0.7	-1	70		Sv

Figura 4 – Risultati dell'impatto radiologico sulla popolazione

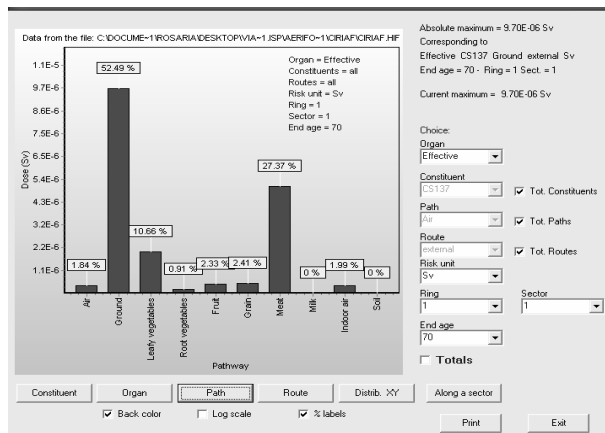


Figura 5 – Graficizzazione dei risultati relativi alle dosi alla popolazione dovute alle vie d'esposizione per rilasci aeriformi

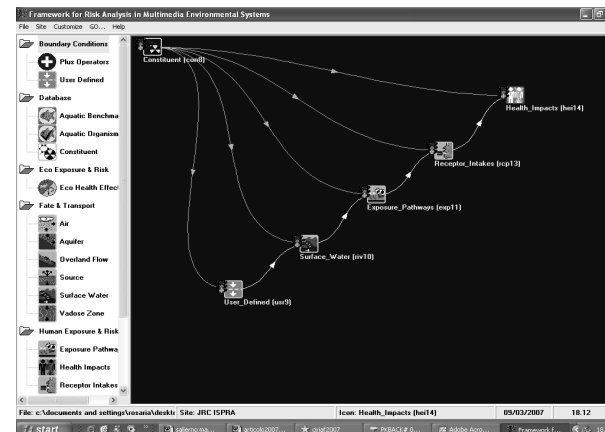


Figura 6 - Modellizzazione del caso studio per rilasci liquidi

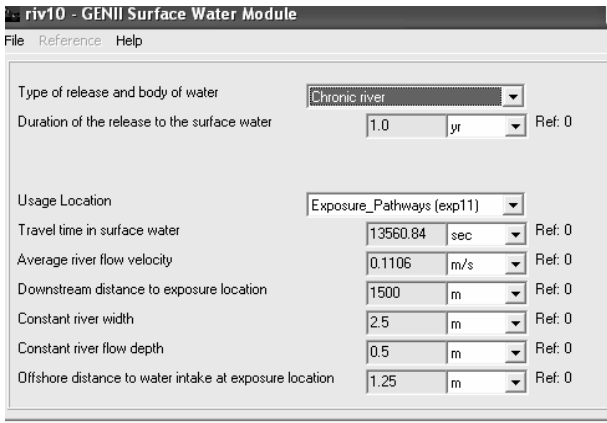


Figura 7 - Input modello di diffusione e trasporto

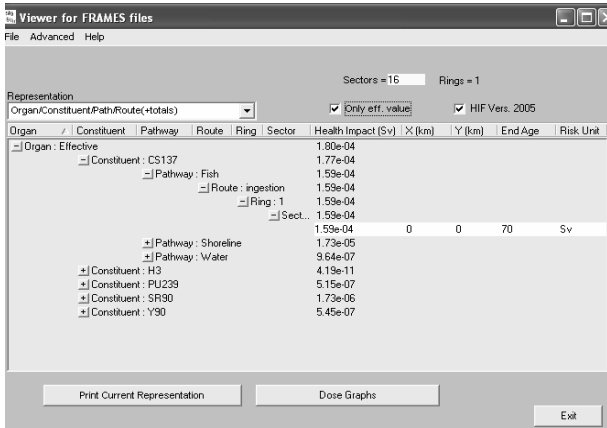


Figura 8 - Risultati dell'impatto radiologico sulla popolazione

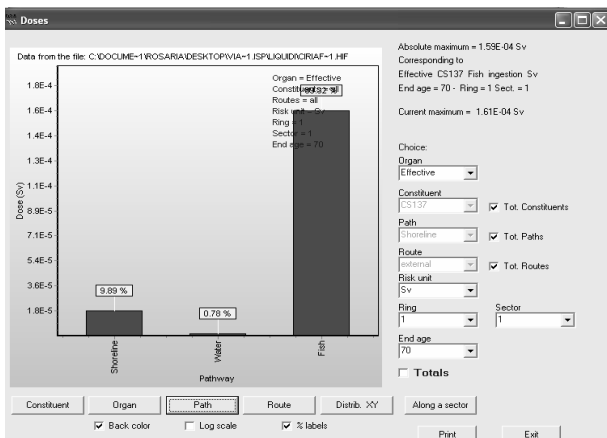


Figura 9 - Graficizzazione dei risultati relativi alle dosi alla popolazione dovute alle vie d'esposizione per rilasci liquidi

### Confronto tra dati sperimentali e dati teorici

Di seguito viene fatto un confronto tra i dati sperimentali ricavati dalle misure effettuate sulle matrici e riportati nel Rapporto di Sorveglianza Annuale, e i dati teorici derivanti dalla simulazione con il modello di calcolo citato in precedenza.

### Simulazione FRAMES\_GENII.

Le ipotesi alla base delle valutazioni effettuate per la determinazione della dose assorbita, nonché delle concentrazioni, sono le seguenti:  
per gli effluenti aeriformi:

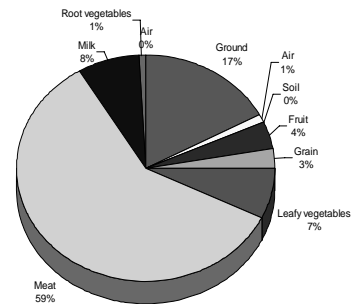
- 100% delle formule di scarico in termini di HTO (vapori di trizio) e di Cs137;
  - HTO(Bq/anno)= 7.40E+13
  - Cs137(Bq/anno)= 7.40E+10
- scenario peggiore per le modalità di scarico (quota di scarico inferiore e concentrata ad un solo camino);
- gruppo critico della popolazione composto da adulti che vivono nella zona circostante il sito ad una distanza compresa tra i 1000 e i 1500 m dal punto di emissione;
- modellizzazione delle abitudini socio economiche più critica.

Di seguito sono riportati sinteticamente i risultati in termini di matrici principali e radionuclidi critici che contribuiscono alla dose massima.

### MAXIMUM DOSES per EXPOSURE PATHWAYS

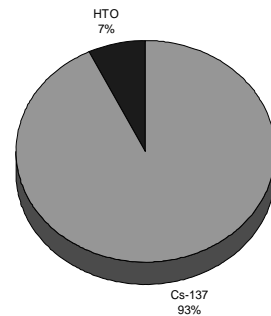
Model: FRAMES

Max individual dose: **57 uSv/year**



### MAXIMUM DOSES per NUCLIDE, Model: FRAMES

Max individual dose: **57 µSv/year**



Per lo scarico degli effluenti liquidi le ipotesi sono le seguenti:

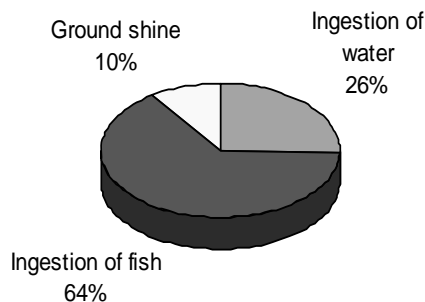
- 100% della formula di scarico liquida in termini di H3, Cs137, Sr90 e Pu 239

Radionuclide	doubtful + active (Bq/year) Discharge (A)
H-3	2.42E+07
Sr-90	1.25E+08
Cs-137	8.50E+08
Pu-239	7.10E+06

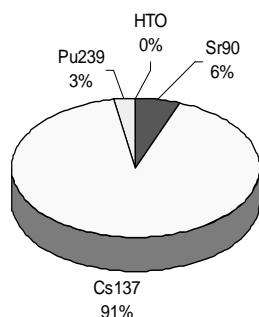
- scenario peggiore per le modalità di scarico (Effluenti dubbi + effluenti radioattivi)
- gruppo critico della popolazione composto da adulti che vivono nella zona circostante il sito
- modellizzazione più critica delle abitudini socio economiche.

I grafici che seguono riportano brevemente le conclusioni relativamente alla massima dose efficace in termini di vie principali di esposizioni e in funzione dei differenti radionuclidi.

DOSES per EXPOSURE PATHWAYS  
Individual Dose **173 (µSv/anno)** – ADULTS



DOSES per NUCLIDE  
Individual Dose **173 (µSv/anno)** – ADULTS



La tabella che segue riporta, per l'inventario realmente scaricato nel 2005, i valori della concentrazione prevista e misurata nonché i valori forniti dal codice di calcolo.

matrice	Concentrazioni e prevista	Concentrazioni e misurata	commenti	Concentr FRAMES
Particolato atmosferico (Bq/m <sup>3</sup> )	Cs137	Cs137: 2,1x10 <sup>-6</sup>	Cs137 non scaricato in atmosfera. Effetto Chernobyl e test nucleari anni '60	4E-3
Vapore acqueo (Bq/m <sup>3</sup> )	HTO: 9,1x10 <sup>-4</sup>	HTO: 1,5x10 <sup>-2</sup>		3.98
Acqua di fiume (Bq/L)	HTO: 1,6x10 <sup>-2</sup> Cs137: 1,7x10 <sup>-3</sup> Am241: 8,8x10 <sup>-3</sup>	HTO: 1,4x10 <sup>-1</sup> Cs137: 9,1x10 <sup>-4</sup> Am241: 1,3x10 <sup>-2</sup>	MAR per HTO. Per altri radionuclidi: effetto combinato di: Chernobyl, scarichi non continui, accumulo nel tempo.	0.005545 0.1948 0.001627
Sedimenti (Bq/kg)	Co60: 4,8x10 <sup>-1</sup> Cs137: 1,7x10 <sup>0</sup>	Co60: 7,7x10 <sup>-2</sup> Cs137: 3,3x10 <sup>-1</sup>	MAR per Co60. Per altri radionuclidi: effetto combinato di: Chernobyl, scarichi non continui, accumulo nel tempo.	2.6
Pesce (Bq/kg)	HTO: 1,6x10 <sup>-2</sup> Co60: 3,6x10 <sup>-2</sup> Sr90: 5,0x10 <sup>-2</sup> Cs137: 3,6x10 <sup>0</sup> Am241: 3,3x10 <sup>-3</sup>	Campione non disponibile		0.005545 1.719 389.7 0.004882
Latte (Bq/L)	Cs137: 0		Cs137 non scaricato in atmosfera: effetto di Chernobyl e accumulo nel tempo	3.15
Foraggio (Bq/kg)	Cs137: 0		Cs137 non scaricato in atmosfera: effetto di Chernobyl e accumulo nel tempo	26.9

Misure sperimentali

La rete di sorveglianza ambientale del sito consta di vari punti di misura diretta e indiretta e di prelievi di campioni distribuiti sia all'interno del sito sia nel territorio circostante. La misura sui campioni prelevati consente di calcolare la concentrazione dei radionuclidi di riferimento e di risalire alla dose ai gruppi critici della popolazione. Nello specifico i controlli vengono effettuati con modalità di seguito riportate:

Aria e deposizioni

Sono installati sistemi a filtro fisso per la raccolta mensile, settimanale e giornaliera del particolato atmosferico e dosimetri ambientali TLD.

Acqua e sedimenti

La contaminazione dell'acqua viene controllata tramite misure su prelievi: in superficie per i corsi d'acqua circostanti l'area del sito; in falda, in pozzi praticati all'interno dell'area del sito stesso; di sedimenti.

Catena alimentare Le matrici che fanno parte della catena alimentare sono suolo, latte, foraggio, pesci, vegetali a foglia larga e miele.

Effluenti radioattivi liquidi ed aeriformi Gli effluenti radioattivi rilasciati al camino sono monitorati in continuo; gli effluenti liquidi sono monitorati prima di ogni rilascio tramite prelievo e misura di aliquote significative.

Dose gamma ambiente

Dosimetri a termoluminescenza sono installati, in numero e in punti significativi e vengono letti periodicamente. Gli effluenti liquidi ed aeriformi scaricati nel corso del 2005 sono riportati nella tabella che segue:

EFFLUENTI	Quantità scaricata m <sup>3</sup>	Alfa totale MBq	Beta totale MBq	Totale MBq	Ce-137 MBq	Co-60 MBq	Am-241 MBq	Sr-90 MBq	Ra-226 MBq	Ra-228 MBq	Altri gamma MBq	% del limite di scarico annuo autorizzato
aeriformi	1,64E+09	N.A.	N.A.	1,97E+05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27
liquidi	40,00	0,42	7,53	70,35	7,82	0,53	0,48	3,63	0,00	0,15	0,15	0,29

CONCLUSIONI

Da una attenta analisi dei dati si può concludere che quelli derivanti dall'output del codice e quelli misurati sperimentalmente sono in soddisfacente accordo considerando gli ampi conservativismi legati alle seguenti ipotesi di calcolo:

- l'inventario radiologico teoricamente considerato corrisponde al 100% della formula di scarico autorizzata mentre in realtà se ne utilizzano soltanto frazioni molto esigue;
- gli scenari previsti sono quelli più critici i quali prevedono un consumo totale, e pertanto non realistico, del prodotto locale;
- non si tiene conto di alcune importanti ipotesi di base quali l'effettiva proibizione di utilizzare l'acqua del fiume per scopi irrigui e il divieto di pesca su tutto il bacino accompagnato dalla scarsità effettiva del prodotto.

BIBLIOGRAFIA

- Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n° 230 e s.m.i.
- C. Rollo - Principi di sorveglianza ambientale- APAT 2002
- ICRP 37-Principle of environmental monitoring related the handling of radioactive materials.
- IAEA Safety Report Series n° 19: Generic Models of Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment
- GENII-FRAMES, Environmental Radiation Dosimetry Software System – EPA 2004
- ICRP 72-Age Dependent Doses to Members of Public from intake of Radionuclides .

## STUDIO DI UN INDICATORE GLOBALE PER LA STIMA DELLA QUALITA' AMBIENTALE NEL CENTRO URBANO DELLA CITTA' DI MESSINA

G. Cannistraro<sup>(\*)</sup><sup>(#)</sup>, L. Ponterio<sup>(#)</sup>, M. Scampitelli<sup>(#)</sup>

(\*) Centro Siciliano per le Ricerche Atmosferiche e di Fisica dell' Ambiente

Contr.da Papardo, Salita Sperone, S. Agata, 98100 Messina

(#)Dipartimento di Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Messina

Contr.da di Dio, 98100 Messina

### SOMMARIO

In questo lavoro viene studiato un indicatore ambientale globale che permette di valutare i livelli di inquinamento sia atmosferico che acustico rilevati nel centro urbano della città di Messina. La zona oggetto di studio, che si estende dall'approdo delle navi della società di traghetti Caronte all'imbocco dell'autostrada che collega la città con gli altri capoluoghi siciliani, quotidianamente interessata da enormi flussi di traffico veicolare, risulta caratterizzata da alti livelli di concentrazioni inquinanti e elevata rumorosità. L'indicatore ambientale permette di stimare il livello qualitativo dell'aria sia riguardo all'inquinamento chimico che riguardo l'inquinamento acustico. L'indice di qualità ambientale è stato stimato dal valore medio delle due concentrazioni di inquinanti più critici presenti in atmosfera, pesato rispetto agli appositi valori di riferimento indicati dal D.M. 2/4/2002 n.60, e del livello equivalente sonoro pesato rispetto agli appositi valori di attenzione indicati dal D.P.C.M. 14.11.1997. I dati necessari per questo studio sono stati forniti dalla Provincia Regionale di Messina.

### 1. INTRODUZIONE

L'inquinamento acustico ed atmosferico contribuiscono attivamente all'invivibilità delle nostre città: essi esercitano una pressione costante che segue l'andamento dei volumi di traffico veicolare, testimoniando ancor di più la fonte comune che lega i due fenomeni, appunto il traffico veicolare. L'emissione di inquinanti atmosferici e il rumore causati dal traffico rappresentano oggi i principali problemi che affliggono soprattutto gli ambiti urbani, e, in maniera più considerevole i centri urbani delle città di medie e grandi dimensioni. Tali fattori inquinanti disturbano e peggiorano la qualità della vita e contribuiscono all'aggravarsi dei problemi socio-sanitari. Il rumore prodotto dal traffico, in particolare, dipende da innumerevoli fattori: la composizione del parco veicolare, la velocità di circolazione, la geometria delle infrastrutture, il tipo, la composizione e le dimensioni della piattaforma stradale, la natura e lo stato manutentivo del piano viabile, la tipologia della segnaletica orizzontale e verticale, le condizioni climatiche, meteorologiche ed ambientali.

Alcuni di questi fattori si ripercuotono in maniera importante sull'inquinamento acustico condizionando, in misura anche molto sensibile, la vivibilità dei centri abitati.

L'inquinamento acustico viene percepito come stimolo sensoriale ed agisce inizialmente sulle attività individuali e collettive, prima di causare veri e propri danni biologici. Un'indagine ISTAT ha messo in evidenza che, in Italia, il rumore occupa il quarto posto nella scala dei problemi ambientali percepiti dai cittadini, dopo il traffico stradale (46,5%), la difficoltà a trovare parcheggio (38,0%) e l'inquinamento dell'aria (37,1%)[1].

Da studi effettuati si stima che il 20% circa della popolazione dell'Unione Europea è esposta a rumori diurni continuati in ambiente esterno, causati principalmente dal

traffico, e superiori al livello di 65 dB(A), ritenuto un limite di tollerabilità per gli individui; mentre oltre il 40% della popolazione è esposta a livelli di rumore compresi tra 55 e 65 db(A), ritenuto un valore di attenzione per il quale si possono manifestare seri disturbi nel periodo diurno [2].

L'esposizione al rumore provoca sull'uomo effetti nocivi classificabili in tre differenti categorie: danni fisici, disturbi nelle attività, annoyance (fastidio generico), in tabella (tab. n. 1) sono riportati i principali danni fisici sull'organismo umano [3].

Tab. n.1 Effetti sull'organismo umano del rumore

Apparato	Sintomi	Evoluzione	Soglia in dB(A)
Cardio-vascolare	Accelerazione ritmo cardiaco Aumento pressione arteriosa	Arterio sclerosi	75
Uditivo	Fischi e ronzii persistenti	Sordità	80
Cerebrale	Disadattamento	Turbe psichiche	95
Digerente	Disturbi digestivi Bruciori di stomaco	Gastrite Ulcera	95
Respiratorio	Tachipnea Diminuzione volume corrente		95
Dell'equilibrio	Vertigine e nausea	Perdita dell'equilibrio	110

Sia nei paesi sviluppati che in quelli in via di sviluppo, la causa principale di inquinamento atmosferico sono le emissioni dei veicoli a motore. Entrambi infatti, motori a benzina e Diesel, immettono nell'atmosfera una grande varietà

di inquinanti, in particolare monossido di carbonio, ossidi di azoto, composti organici volatili e particolato, che compromettono in misura sempre maggiore la qualità dell'aria urbana.

Alla situazione di inquinamento già grave si aggiunge l'azione dei raggi solari che provoca reazioni fotochimiche in alcuni inquinanti quali il biossido di azoto ed i composti organici volatili con formazione di ozono troposferico, un inquinante secondario, che permane a livello del terreno e si sposta rapidamente dalle zone urbane a quelle rurali; le emissioni di ossidi di azoto dai veicoli contribuiscono inoltre alla formazione delle piogge acide.

## 2. LA NORMATIVA EUROPEA

L'Unione Europea ha affrontato il problema dell'inquinamento atmosferico, approvando negli anni Direttive sempre più rigorose, tra le quali ricordiamo la Direttiva 80/779/CE sui valori limite e valori guida per la qualità dell'aria del biossido di zolfo e del particolato sospeso; così come modificata dalla Direttiva 89/427/CE, la Direttiva 82/884/CE sui valori limite per il piombo, la Direttiva 85/203/CE sui valori standard di qualità dell'aria per il biossido di azoto, così come modificata dalla Direttiva 85/580/CE, la Direttiva 96/61/CE [4] sulla prevenzione e sul controllo dell'inquinamento.

Per il settore dei trasporti, la Carta Verde su Trasporti ed Ambiente e la Carta Bianca, hanno affermato la necessità di sviluppare ed attuare apposite leggi per lo sviluppo di una politica dei trasporti comune. In seguito a questi accordi, nel 1993, 1994 per i nuovi veicoli, nuovi valori limite sono entrati in vigore per i veicoli commerciali leggeri e nel 1996, 1997 per le automobili nuove, ulteriori limiti sono stati stabiliti anche per le automobili sia con motore a benzina che Diesel; il rispetto dei valori limite introdotti dalle nuove normative ha condotto ad una significativa riduzione delle emissioni inquinanti totali per le automobili ed i veicoli commerciali leggeri; per i mezzi pesanti, i nuovi valori-limite sono stati applicati nel 1995, 1996 per i veicoli nuovi.

Per quel che riguarda il problema dell'inquinamento acustico, esso è stato considerato con particolare attenzione dall'Unione Europea in seguito al Trattato di Maastricht, e, in particolare, con il quinto programma d'azione a favore dell'ambiente che ha condotto all'emanazione della Direttiva 2002/49/CE del 25 giugno 2002 [5], relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale. Punti innovativi della Direttiva sono l'introduzione di nuovi descrittori per valutare il fastidio prodotto dal rumore, delle modalità per la loro determinazione, nonché dell'obbligo di elaborare, da parte degli enti competenti, delle mappe acustiche strategiche di tutti gli agglomerati con più di 250.000 abitanti e degli assi stradali caratterizzati da elevati flussi veicolari.

## 3. LA NORMATIVA ITALIANA

In Italia, la prima normativa che ha regolamentato l'inquinamento atmosferico e, in particolare l'emissione di composti organici volatili, è stato il D.P.R. n. 203/'88 con il suo decreto applicativo, D.M. 12.07.1990, "Linee-guida per il controllo delle emissioni inquinanti dagli impianti industriali e valori minimi di emissione", secondo l'art. 15 della legge 16.04.1987, n.183, in recepimento delle prime direttive

comunitarie 80/779/CE, 82/884/CE, 84/360/CE e 85/203/CE. In tempi più recenti, sulle emissioni limiti di composti organici volatili, è stato promulgato il D.M. 16.01.2004 n. 44, in recepimento della Direttiva del Consiglio 99/13/CE.

Nel 1999 è stato emanato il D. L.vo 4/8/99 n. 351, in recepimento della Direttiva 96/62/CE [6] sulla stima e sulla gestione della qualità dell'aria. Attualmente, in Italia, è in vigore il D.M. 2/4/2002 n.60 [7] che ha recepito i valori limite di qualità dell'aria imposti dalle Direttive Europee 99/30/CE e 2000/62/CE.

Per quel che riguarda l'inquinamento da rumore, il primo strumento normativo che in Italia ha regolamentato il settore da rumore è stato il Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 1/3/91 "Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno", ma la vera riforma innovativa si ha nel 1995 con la legge quadro n. 447 [8]. La portata innovativa di tale provvedimento risiede nel fatto che le problematiche relative all'inquinamento acustico sono affrontate in maniera preventiva quale fattore della pianificazione urbanistica e produttiva.

Principio ispiratore della nuova legge è senz'altro quello del decentramento delle funzioni ottenuto rafforzando il ruolo degli enti locali e principalmente dei comuni, assegnando a questi alcune competenze quali la classificazione del territorio comunale, il coordinamento degli strumenti urbanistici già adottati con le determinazioni assunte dalla classificazione del territorio e l'adozione dei piani di risanamento. La legge quadro introduce un'importante strumento di pianificazione quale la classificazione del territorio denominata anche zonizzazione acustica, essa consiste nell'assegnazione, a ciascuna porzione omogenea di territorio, di una delle sei classi individuate dal D.P.C.M. 14 novembre 1997 [9], sulla base della prevalente ed effettiva destinazione d'uso del territorio stesso.

Per disciplinare i diversi ambiti previsti dalla legge n. 447/'95 sono stati in seguito emanati numerosi decreti attuativi, quelli disciplinanti il rumore da traffico stradale, utili ai fini del calcolo proposto in questo lavoro sono il Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 14 novembre 1997, Decreto del Ministero dell'Ambiente del 16 marzo 1998 [10] e il Decreto del Presidente della Repubblica, n. 142 del 30 Marzo 2004 [11].

Il primo introduce i limiti di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno, il secondo disciplina le tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico, mentre l'ultimo contiene disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell'inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare.

## 4. L'INDICE DI QUALITÀ AMBIENTALE GLOBALE

E' molto importante, soprattutto nelle grandi città, avere la possibilità di informare la popolazione, al fine di tutelarne la salute, ed in maniera semplice e immediata, sulla qualità dell'aria che sta respirando e sulla presenza o meno di sorgenti di rumore che potrebbero dar luogo a disturbi quali fastidio, annoyance o, nei casi più gravi, danni fisici all'organismo umano, il tutto con un unico indice di qualità ambientale.

L'indice globale di qualità ambientale proposto in questo lavoro è un indicatore della qualità dell'ambiente urbano, e permette di fornire ai cittadini informazioni sullo stato di inquinamento sia acustico che atmosferico della zona in cui si trovano, in qualsiasi ora del giorno. Tale indice permette di stimare il livello qualitativo dell'aria in base ai livelli misurati

di concentrazione degli inquinanti più critici e dal livello di inquinamento acustico misurato. L'indice di qualità ambientale globale si valuta come valore medio tra l'indice di qualità dell'aria e l'indice di inquinamento da rumore; in particolare esso si ottiene dal valore medio delle due concentrazioni di inquinanti peggiori, pesato rispetto agli appositi valori di riferimento indicati dal D.M. 2/4/2002 n.60, e del livello equivalente sonoro pesato rispetto agli appositi valori di attenzione indicati dal D.P.C.M. 14.11.1997. Tale indicatore assume valori in un intervallo numerico da 1 a 7 (Tab. n. 2), e permette di stabilire il grado di soddisfazione della popolazione nei riguardi dell'ambiente che la circonda, sia come qualità dell'aria respirata sia come qualità acustica, e di portare a conoscenza della popolazione, gli eventuali rischi per la propria salute.

Alti valori dell'indice, segnalano aria maggiormente inquinata, sia dal punto di vista chimico, contenente pertanto elevate concentrazioni di sostanze inquinanti e sia dal punto di vista dell'inquinamento fisico, ossia dell'inquinamento acustico. Al contrario, valori bassi dell'indice, nell'intervallo da 1 a 3, corrispondono ad un ambiente senza rischi per la salute.

Tab. n. 2 – Indice di Qualità Ambientale Globale: valori, indicatori di qualità, indicatori numerici, e rischi per la salute

Valore Numerico	Indicatore di qualità globale	Indicatore numerico	Rischi per la popolazione
0 ÷ 50	Ottima	1	Assenza di rischi per la popolazione
51 ÷ 75	Buona	2	Assenza di rischi per la popolazione
76 ÷ 100	Discreta	3	Assenza di rischi per la popolazione
101 ÷ 125	Mediocre	4	Disturbi da inquinamento atmosferico: lievi sintomi respiratori per le persone sofferenti di asma, bronchiti croniche o cardiopatie durante intensa attività fisica. Disturbi da rumore: disturbo del sonno e del riposo.
126 ÷ 150	Poco Salubre	5	Disturbi da inquinamento atmosferico: rischio per persone cardiopatiche, anziani e bambini. Disturbi da rumore: disturbo ed affaticamento, danno psichico, neurovegetativo e in alcuni casi uditivo
151 ÷ 175	Insalubre	6	Disturbi da inquinamento atmosferico: sintomi negativi, comunque reversibili, sintomi più seri per le persone deboli. Disturbi da rumore: prevalgono gli effetti specifici su quelli psichici e quelli neurovegetativi.
> 175	Molto Insalubre	7	Disturbi da inquinamento atmosferico: lievi effetti negative sulla salute, maggiori rischi per anziani, bambini e persone con problemi respiratori. Disturbi da rumore: rumore impossibile da sopportare senza adeguata protezione, insorgenza immediata o comunque molto rapida del danno

## 5. IL CALCOLO DELL'INDICE DI QUALITÀ DELL'ARIA

L'indice di qualità dell'aria, utile per il calcolo dell'Indice di Qualità Ambientale Globale, viene valutato in base al procedimento di calcolo già riportato in un precedente lavoro [12], come valore medio tra due sottoindici:

$$I_{IGA} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

I due sottoindici  $I_1$  e  $I_2$  indicano i livelli di concentrazione in atmosfera dei due inquinanti più critici calcolati, tramite la seguente procedura:

$$I_X = \frac{V_{\max hX}}{V_{rifX}} * 100$$

In cui:  $I_X$  = indice di qualità dell'aria dell'inquinante x;

$V_{\max hX}$  = massimo valore in un determinato periodo di tempo stabilito dalla normativa, dei valori medi orari dell'inquinante x, in tutte le stazioni di monitoraggio;

$V_{rifX}$  = valore limite della concentrazione in atmosfera dell'inquinante x da rispettare per la protezione della salute umana in base al D.M. 2002, n.60.

## 6. IL CALCOLO DELL'INDICE DI INQUINAMENTO DA RUMORE

L'Indice di Inquinamento da Rumore è stato calcolato come valore medio tra due sottoindici:

$$I_{NP} = \frac{I_{day} + I_{night}}{2}$$

Tab. n. 3 – Indice di Inquinamento da Rumore: valori, indicatori di qualità, indicatori numerici, e rischi per la popolazione

Valore Numerico	Indicatore di Inquinamento da Rumore	Indicatore numerico	Rischi per la popolazione
0 ÷ 50	Ottima	1	Rumore che non arreca né fastidio né danno
51 ÷ 75	Buona	2	Rumore che non arreca né fastidio né danno
76 ÷ 100	Discreta	3	Rumore che non arreca né fastidio né danno
101 ÷ 125	Mediocre	4	Rumore fastidioso e molesto, che può disturbare il sonno e il riposo
126 ÷ 150	Poco Salubre	5	Rumore che disturba ed affatica, capace di provocare danno psichico e neurovegetativo e in alcuni casi uditivo
151 ÷ 175	Insalubre	6	Rumore pericoloso: prevalgono gli effetti specifici su quelli psichici e quelli neurovegetativi
> 175	Molto Insalubre	7	Rumore molto pericoloso: impossibile da sopportare senza adeguata protezione. Insorgenza immediata o comunque molto rapida del danno

I due sottoindici di inquinamento acustico  $I_{day}$  e  $I_{night}$  corrispondono rispettivamente ai livelli equivalenti sonori diurno e notturno e sono stati calcolati tramite la seguente formula:

$$I_X = \frac{L_{eq \max hX}}{L_{eq \lim X}} * 100$$

In cui:  $I_X$  = sottoindice di inquinamento acustico nel periodo x (diurno o notturno);

$L_{eq \max hX}$  = massimo valore nel periodo x (diurno o notturno), dei valori medi orari del livello sonoro equivalente, in tutte le stazioni di monitoraggio;

$L_{eq \lim X}$  = valore limite di attenzione del livello equivalente sonoro nel periodo x (diurno o notturno) da rispettare per la protezione della salute umana in base al D.P.C.M. 14.11.1997.

L'indice di Inquinamento da Rumore assume valori nell'intervallo da 1 a 7, come riportato in tabella (tab. n. 3); i valori più bassi, da 1 a 3, indicano che il livello di rumore ambientale non causa problemi alla salute, mentre valori più elevati, da 4 a 7, segnalano la presenza di sorgenti di rumore

che possono provocare semplice fastidio o addirittura determinare l'insorgenza immediata di danni.

## 7 IL CALCOLO DELL'INDICE DI INQUINAMENTO AMBIENTALE GLOBALE

L'Indice di Qualità Ambientale Globale è stato valutato in ogni stazione di monitoraggio, come valore medio tra l'Indice di Qualità dell'Aria e l'Indice di Inquinamento da Rumore. Pertanto è stato calcolato in base alla seguente formula:

$$I_{QAG} = \frac{I_{QA} + I_{NP}}{2}$$

Tale indicatore assume valori in un intervallo numerico da 1 a 7, e permette di stabilire il grado di soddisfazione della popolazione nei riguardi dell'ambiente che lo circonda, sia come qualità dell'aria respirata sia come qualità acustica, e di conoscere gli eventuali rischi per la salute umana di una prolungata esposizione.

## 8. APPLICAZIONE AD UN CASO-STUDIO: LA CITTÀ DI MESSINA

Il metodo di calcolo dell'Indice di Qualità Ambientale Globale è stato applicato nel centro urbano di Messina, allo scopo di quantificare l'inquinamento atmosferico ed acustico ed i suoi effetti negativi sulla salute della popolazione. I dati utilizzati per lo studio sono stati forniti dalla Provincia Regionale di Messina, rilevati tramite una campagna di misura effettuata nell'anno 2005. Le misure di concentrazioni di inquinanti sono state rilevate in quattro stazioni di monitoraggio situate nelle zone più critiche dal punto di vista del traffico veicolare, quali l'area dello svincolo autostradale di viale Bocchetta, la zona circostante l'approdo della società di traghetti Caronte e l'area sede del Tribunale e dell'Università. I valori di livelli equivalenti sonori sono stati monitorati oltre che nelle stazioni precedentemente elencate, anche in ulteriori 10 stazioni situate nel centro urbano della città [13].

## 9. VALORI DELL'INDICE DI QUALITÀ AMBIENTALE GLOBALE NELLA CITTÀ DI MESSINA E ANALISI DEI RISULTATI

In base al procedimento di calcolo già riportato, è stato valutato per ogni giorno dell'anno 2005 l'Indice di Qualità dell'Aria, ottenendo in tal modo l'andamento annuale medio giornaliero del livello di qualità dell'aria in ciascuna stazione di monitoraggio.

E' stato inoltre valutato l'Indice di Inquinamento da Rumore secondo la procedura riportata nel paragrafo 6.

In figura (fig. n. 1) sono riportati alcuni valori assunti dall'Indice di Inquinamento da Rumore per la stazione di monitoraggio Bocchetta nel periodo dal 11.04.05 al 17.04.05. Il valore dell'indice in tale stazione risulta essere pari ai valori 4 e 5 corrispondenti ad una qualità acustica rispettivamente mediocre e insalubre.

Il valore medio dei due indici ha poi permesso di calcolare l'Indice di Qualità Ambientale Globale come indicato nel paragrafo 7.

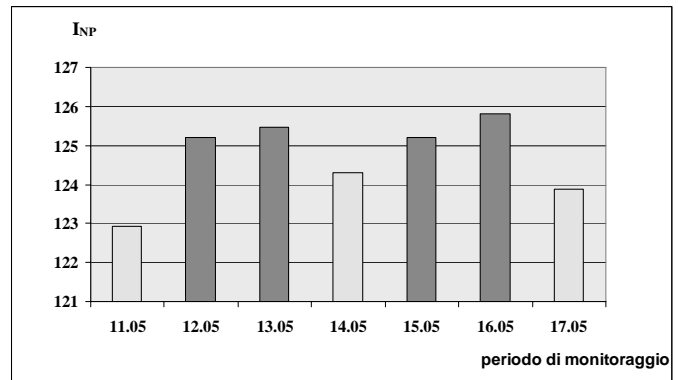


Fig. n. 1 – Indice di Inquinamento da Rumore nella stazione Bocchetta nel periodo dal 11.04.05 al 17.04.05

Dall'esame dei risultati le zone più inquinate sia dal punto di vista acustico che atmosferico risultano essere l'area circostante l'approdo dei traghetti privati, corrispondenti alla stazione di monitoraggio Caronte e la zona vicina allo svincolo autostradale di Viale Bocchetta, corrispondente alla stazione di monitoraggio Bocchetta.

Nella prima i più alti valori dell'indice sono stati ottenuti durante i mesi invernali, da ottobre fino a marzo (fig. n. 2), andamento giustificato dall'enorme flusso di traffico pendolare, costituito da autoveicoli, leggeri e pesanti, di passaggio dalla Sicilia verso il resto d'Italia e viceversa, che interessa la zona principalmente in questo periodo. La qualità ambientale in tale zona, sia dal punto di vista del livello di concentrazioni di inquinanti che per quanto riguarda la rumorosità risulta essere molto insalubre.

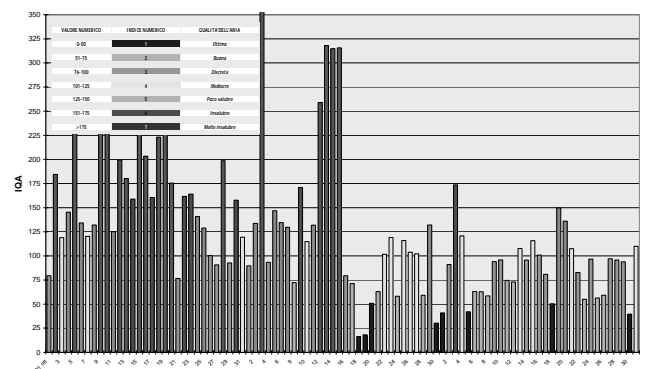


Fig. n. 2 – Andamento dell'Indice di Qualità Ambientale Globale per la stazione Bocchetta nel periodo ottobre-novembre 2005

## 10. CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato studiato l'inquinamento acustico ed atmosferico in alcune zone ad alta densità di traffico del centro urbano della città di Messina. E' stata messa a punto una procedura di calcolo di un indicatore che tiene conto sia delle concentrazioni di inquinanti nell'aria sia del livello di rumorosità di una determinata zona del centro urbano della città. La procedura di calcolo dell'Indice di Qualità Ambientale Globale, è basata sulla media dei valori di due indicatori di inquinamento atmosferico ed acustico messi a punto per la città di Messina. Il primo, l'Indice di Qualità

dell'Aria, misura la qualità dell'aria esterna ed è stato studiato in un precedente lavoro, il secondo, l'Indice di Inquinamento da Rumore, misura la qualità acustica della zona oggetto di studio ed il suo procedimento di calcolo è stato analizzato in questo lavoro. Le concentrazioni di inquinanti sono state rilevate dall'Assessorato all'Ambiente della Provincia Regionale di Messina durante l'anno 2005 e sono relative a monossido di carbonio, benzene, particolato, biossido di azoto ed ozono.

L'Indice di Qualità Ambientale Globale assume valori in una scala da 1 a 7, crescente con il livello di inquinamento; tale indice serve anche ad informare la popolazione sui danni che può provocare alla salute una prolungata esposizione sia all'aria dell'ambiente in cui ci si trova sia ai livelli di rumore immessi nell'ambiente.

Dall'analisi dell'Indice di Qualità Ambientale nella città di Messina è emerso che le zone più inquinate, sia dal punto di vista atmosferico che acustico, risultano essere la zona di approdo dei traghetti che collegano la Sicilia con la Calabria e la zona dello svincolo autostradale di Viale Bocchetta. Entrambe sono infatti interessate da un enorme carico di flussi stradali dalla Sicilia verso il resto d'Italia.

## BIBLIOGRAFIA

1. [www.provincia.pisa.it](http://www.provincia.pisa.it)
2. [www.comune.ozzano.bo.it](http://www.comune.ozzano.bo.it)
3. "Relazione sullo stato dell'Ambiente, 2001", Ministero dell'Ambiente, ANPA, 2000;
4. Council European Union, Directive 96/61/CE of 24.09.1996, Official Journal of the European Communities, L 257, 10.10.1996, p. 26;
5. Direttiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 giugno 2002, relativa alla determinazione e alla gestione del rumore ambientale;
6. Council European Union, Directive 1996/62/CE of 27.09.1996, Off. Journ. of the Eur. Communities, L 296, 21.11.1996, p. 55;
7. D. M. 2 aprile 2002, n. 60 "Recepimento della Dir. 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 dei 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 Dir. 2000/69/CE relativa ai valori limite di qualità dell'aria ambiente per il benzene ed il monossido di carbonio, suppl. n. 77 alla G.U. n. 87 del 13 aprile 2002;
8. Legge 26-10-1995 n. 447, "Legge quadro sull'inquinamento acustico";
9. Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri, 14-11-1997 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore", pubblicato nella Gazz. Uff. 1° dicembre 1997, n. 280;
10. Decreto 16 marzo 1998 del Ministero dell'Ambiente "Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico";
11. D.P.R. 30 marzo 2004, n.142 "Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell'inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare", a norma dell'articolo 11 della legge 26 ottobre 1995, n. 447;
12. Uso Dell'indice di Qualità dell'aria per la Valutazione dell'inquinamento Atmosferico a Messina, G. Cannistraro, G. Lupo, A. Piccolo, L. Ponterio, Atti del Congresso Nazionale C.I.R.I.A.F., pp. 375-381;
13. "Monitoraggio del rumore da traffico veicolare", Comune di Messina, Servizio di Monitoraggio Ambientale, 2005.



**SESSIONE**

**INQUINAMENTO ATMOSFERICO**



## UN MODELLO LAGRANGIANO-PROBABILISTICO PER LO STUDIO DELLA DIFFUSIONE DI INQUINANTI GASSOSI IN ATMOSFERA

Roberto Cipollone, Emanuela Foglia

Università degli Studi dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale  
67040 Monteluco di Roio, L'Aquila, Italia

### SOMMARIO

Il lavoro presenta alcuni risultati riguardanti lo sviluppo di un modello lagrangiano-probabilistico per lo studio della diffusione di inquinanti gassosi inerti in atmosfera, emessi da sorgenti puntiformi di portata comunque variabile nel tempo.

Nella formulazione lagrangiana com'è noto si fa uso di una funzione densità di probabilità di transizione che esprime la *tendenza direzionale* che una porzione infinitesima di specie inquinante ha di *riempire* lo spazio; usualmente tale funzione è di tipo gaussiano e ciò impedisce in numerosi casi una soluzione analitica per il campo di concentrazione.

Nel modello discusso, grazie ad una formulazione innovativa per la funzione densità di probabilità di transizione, risulta possibile recuperare per diverse situazioni diffusive di interesse ingegneristico, una forma analitica per la soluzione, conferendo versatilità e snellezza di applicazione per un ampio numero scenari meteo-climatici.

La validità della formulazione proposta è stata verificata su domini spaziali mono-dimensionali e tridimensionali tramite confronto con le tradizionali formulazioni gaussiano-probabilistiche; nonostante la sensibile semplificazione analitica, il confronto mostra differenze del tutto accettabili per gli scopi cui usualmente si fa riferimento negli studi applicativi della diffusione

### INTRODUZIONE

Lo studio della diffusione degli inquinanti in atmosfera riveste un ruolo fondamentale nell'ambito dell'inquinamento atmosferico, avvalorato dal significativo interesse scientifico di settore. La modellistica sulla diffusione degli inquinanti in atmosfera, infatti, presenta una duplice funzione, essendo *strumento utile sia in fase di progetto che in fase di verifica della qualità dell'aria*. Usualmente la soluzione del problema della diffusione ha fatto riferimento al secondo aspetto; le esigenze della pianificazione energetica ed ambientale a livello territoriale hanno ampliato l'importanza del calcolo della concentrazione delle specie in atmosfera alla fase di progettazione, raccogliendo così le esigenze del territorio e valorizzandone le caratteristiche meteo-climatiche. Per tale ragione, le recenti normative italiane riguardanti le linee guida per la classificazione della modellistica esistente e i relativi campi di applicazione [1-2] appaiono un importante strumento di guida recependo quanto già espresso dalle precedenti normative statunitensi redatte dall'EPA (Environmental Protection Agency), [3-4].

Il calcolo della diffusione degli inquinanti in atmosfera viene, come noto, condotto facendo ricorso ad un approccio euleriano o ad un approccio lagrangiano.

Il primo calcola in modo deterministico la concentrazione dell'inquinante, risolvendo l'equazione di conservazione della massa della specie inquinante in presenza di diversi meccanismi di trasporto fisicamente descritti, a valle di numerose semplificazioni riguardanti gli scambi di quantità di moto e di energia con il mezzo (atmosfera). Tali approssimazioni consentono sovente al campo di concentrazione una soluzione analitica, [5, capitolo 13] nei casi di interesse ingegneristico (sorgenti puntuali, lineari, intensità di emissione costante, etc...).

Più significativa è la soluzione offerta tramite un metodo lagrangiano, [5-6], che si orienta verso un approccio probabilistico, introducendo una funzione densità di probabilità di transizione che descrive la *tendenza direzionale* di una particella inquinante a muoversi nello spazio. La letteratura fa riferimento per tale densità di probabilità a formulazioni gaussiane che consentono una corrispondenza tra le transizioni spaziali delle particelle di inquinante ed i meccanismi di trasporto fisici connessi ai fenomeni macroscopici (campo di moto medio del mezzo) e microscopici (turbolenza e diffusione molecolare). In tal modo, però, l'espressione della concentrazione non è più riconducibile ad una formulazione analitica perdendone i vantaggi connessi. In questi casi, infatti, l'espressione che dà la concentrazione diventa uno strumento facilmente fruibile e semplifica in modo sostanziale alcune tipologie di analisi (Studio d'Impatto Ambientale SIA, Valutazione d'Impatto Ambientale VIA, Valutazione Ambientale Strategica VAS,...), recuperando un forte significato ingegneristico alla specifica applicazione.

In questo lavoro vengono presentati alcuni risultati preliminari prodotti da un modello originale che risolve la complessità analitica intrinseca nelle formulazioni lagrangiane: il modello propone una funzione densità di probabilità di transizione spaziale della specie inquinante di tipo bilaterale di Laplace, MBL. In tal modo è possibile giungere a soluzioni analitiche per il campo di concentrazione anche nei casi in cui le formulazioni lagrangiano-gaussiane non lo consentono. In virtù di tali formulazioni analitiche, il modello appare intermedio tra i modelli gaussiani analitici ma di limitata significatività e quelli lagrangiani che recuperano capacità di rappresentazione a scapito però di una soluzione non analitica. Tramite MBL è anche possibile rappresentare vincoli climatici ed orografici alla diffusione delle specie

inquinanti (barriere architettoniche, presenza di altezze di mescolamento,...) nonché scenari in cui le caratteristiche meteo-climatiche medie (velocità del vento, condizioni di stabilità atmosferica,...) variano nel tempo, ancora nell'ipotesi di isotropia spaziale.

## IL MODELLO DELLA BILATERALE DI LAPLACE-MBL

### Dominio di diffusione mono-dimensionale

Nel caso di un dominio mono-dimensionale l'espressione della concentrazione di una specie inquinante gassosa in atmosfera prodotta da una sorgente puntiforme posta nell'origine del dominio  $S(t)$  può essere valutata tramite l'equazione (1), [7-8]:

$$\langle C(x,t) \rangle = \int_t S(t') Q(x,t,t') dt' \quad (1)$$

essendo  $Q(x,t,t')$  la funzione densità di probabilità di transizione.

Il modello matematico della bilaterale di Laplace MBL, sostituisce alla funzione densità di probabilità di transizione,  $Q(x,t,t')$  di tipo gaussiano, l'espressione tipica della esponenziale bilaterale,  $FDP_{BL}$ , [7-8], data dalla:

$$Q(x;t,t') = FDP_{BL}(x,t,t') = Ae^{-\alpha|x-\bar{x}|} \quad (2)$$

essendo  $\bar{x} = \bar{u}t$ .  $(A, \alpha)$  rappresentano i coefficienti da determinare imponendo due condizioni date da:

$$\int_{\square} FDP_{BL}(x,t,t') dx = 1 \quad (3a)$$

$$\sigma_{BL}^2 = \sigma_x^2 \quad (3b)$$

che esprimono una proprietà fondamentale delle funzioni densità di probabilità (3a) e che il momento del secondo ordine  $\sigma_{BL}^2$  della  $FDP_{BL}$  coincida con la varianza della  $Q(x,t,t')$  assunta come funzione gaussiana  $\sigma_{Gauss}^2$ . La (3a) conduce a:

$$A = \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

L'equazione (3b) consente di esprimere la  $\sigma_{BL}$  in funzione di un'ampia serie di correlazioni semiempiriche che forniscono la dipendenza delle dispersioni laterali dai parametri meteo-climatici del dominio spaziale preso in esame.

Nel caso di sorgente con emissione unitaria e costante nel tempo, la (1) conduce alla:

$$\langle C(x,t) \rangle = \begin{cases} \frac{1}{2\bar{u}} e^{-\alpha x} [e^{\alpha \bar{u}t} - 1] & \forall t < \frac{x}{\bar{u}} \\ \frac{1}{2\bar{u}} [2 - e^{-\alpha x} - e^{\alpha(x-\bar{u}t)}] & \forall t \geq \frac{x}{\bar{u}} \end{cases} \quad (5)$$

mentre nel caso si consideri una FDP di tipo gaussiano si

perde la formulazione analitica e la soluzione diventa:

$$C(x,t) = \frac{1}{\bar{u}} \left\{ \operatorname{erf} \left[ -\frac{x-\bar{u}t}{\sigma_x} \right] - \operatorname{erf} \left[ -\frac{x}{\sigma_x} \right] \right\} \quad (6)$$

Nelle equazioni (5-6)  $\bar{u}$  rappresenta la velocità media del vento nel dominio spaziale considerato, mentre  $\sigma_x$ , in una correlazione con i fenomeni fisici, è la dispersione turbolenta in direzione x.

### Dominio di diffusione tri-dimensionale

Nel caso di dominio tri-dimensionale, la (1) assume la forma:

$$\langle C(\bar{x},t) \rangle = \int_t Q(\bar{x},t,t') S(t') dt' \quad (7)$$

essendo  $\bar{x} (x,y,z)$  il vettore posizione nello spazio.

La funzione  $Q(\bar{x},t,t')$  risulta nel caso di formulazione BL data dalla:

$$FDP_{BL}(x,y,z) = \prod_{i=x,y,z} FDP_{BL,i}(i) \quad (8)$$

essendo le condizioni di compatibilità date dalla

$$A_i = \frac{\alpha_i}{2} \quad \text{con } i = x,y,z \quad (9a-b-c)$$

$$\sigma_{BL,i}^2 = \sigma_i^2 \quad \text{con } i = x,y,z \quad (10a-b-c)$$

Nel caso ancora di sorgente emissiva di portata costante  $q$ , la soluzione per il campo di concentrazione diventa:

$$\langle C(x,y,z,t) \rangle = \begin{cases} \frac{q}{4\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\alpha_y|y|} e^{-\alpha_z|z|} e^{-\alpha_x x} [e^{\alpha_x \bar{u}t} - 1] & (11a) \\ \frac{q}{4\bar{u}\sigma_y\sigma_z} e^{-\alpha_y|y|} e^{-\alpha_z|z|} [2 - e^{-\alpha_x x} - e^{\alpha_x(x-\bar{u}t)}] & (11b) \end{cases}$$

essendo le (11a-b) valide, rispettivamente, per  $t < \frac{x}{\bar{u}}$  e

$$t \geq \frac{x}{\bar{u}}.$$

## RISULTATI

### Dominio di diffusione mono-dimensionale

La validità della formulazione proposta che conduce alla (5) è stata verificata per confronto con quanto espresso dalla (6) valutando la *erf* in forma discreta. I casi analizzati fanno riferimento alle situazioni di tabella (1) che rappresentano situazioni meteo-climatiche caratterizzate da diverse dispersioni orizzontali  $\sigma_x$ , per differenti posizioni di osservazione della concentrazione ( $x_{ob}$ ). Le soluzioni sono state valutate per una stessa velocità del vento  $\bar{u}$ , per una sorgente posta in posizione  $x_s$  con un passo di calcolo pari a  $\Delta t$ .

Per ogni prova riportata in tabella (1), il confronto tra i valori espressi dalla (5) e dalla (6) è stato effettuato sino a raggiungimento dello stato di regime. La figura (1) riporta il rapporto tra le concentrazioni offerte dalle due formulazioni: è evidente come tutti i confronti (nel tempo ed a regime) si posizionino sulla bisettrice del piano manifestando un'efficace validità di rappresentazione offerta dalla (5), nonostante la sua semplicità analitica rispetto alla (6). Le due rette riportate in Figura 1 individuano un campo di variazione delle concentrazioni (tra i due modelli) che pur rappresenterebbero in letteratura ancora una buona confidenza, [9]. In relazione a tale criterio, è opportuno che il rapporto tra le concentrazioni rispetti la condizione:

$$0.5 \leq \frac{C(x,t)_{\text{MBL, Eq.(5)}}}{C(x,t)_{\text{Gauss. Eq.(6)}}} \leq 2$$

L'ampio campo di variazione riportato in tabella (1) induce a ritenere che tale comportamento possa essere esteso a qualsiasi scenario emissivo.

Tabella 1: Casi analizzati nelle simulazioni con l'approccio 1D.

Prova	$\bar{u}$ [m/s]	$\sigma_x$ [m]	$x_{\text{ob}}$ [m]	$x_s$ [m]	$\Delta t$ [s]
Prova 01	5.0	100	50	15	10
Prova 02	5.0	250	100	15	10
Prova 03	5.0	450	250	15	10
Prova 04	5.0	600	750	15	10
Prova 05	5.0	700	1500	15	10
Prova 06	5.0	800	2500	15	10

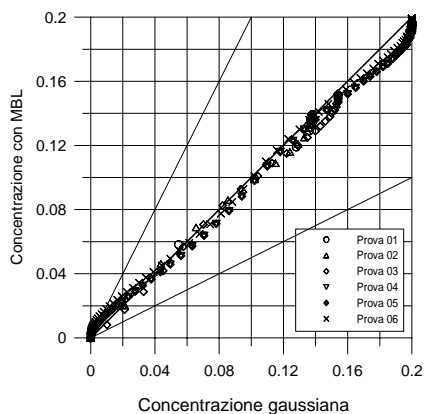


Figura 1: Confronto tra i valori di concentrazione calcolati tramite le (5-6).

### Dominio di diffusione tri-dimensionale

Le espressioni offerte dalla (11) sono state confrontate a regime con quelle valutabili dalla:

$$C(x, y, z, t) = \frac{q}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)\bar{u}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y(x)}\right)^2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_e}{\sigma_z(x)}\right)^2} \quad (12)$$

che esprime la concentrazione in forma euleriano-gaussiana<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> L'espressione (12) è stata modificata per la determinazione della concentrazione a distanze dalla sorgente per le quali diventa significativa la presenza dell'altezza di

Una prima serie di confronti è stata effettuata con riferimento ai dati di tabella (2) per evidenziare le differenze imposte dalle variazioni della temperatura di uscita dell'inquinante ( $T_{\text{fumi}}$ ): si è fatto volutamente riferimento a *fumi freddi* (300.0 K) così come a fumi caratterizzati da tipiche temperature di emissione (420.0 K). L'altezza effettiva di emissione  $H_e$  è stata valutata in tutti i casi facendo riferimento alle formule di Briggs [5, capitolo 14].

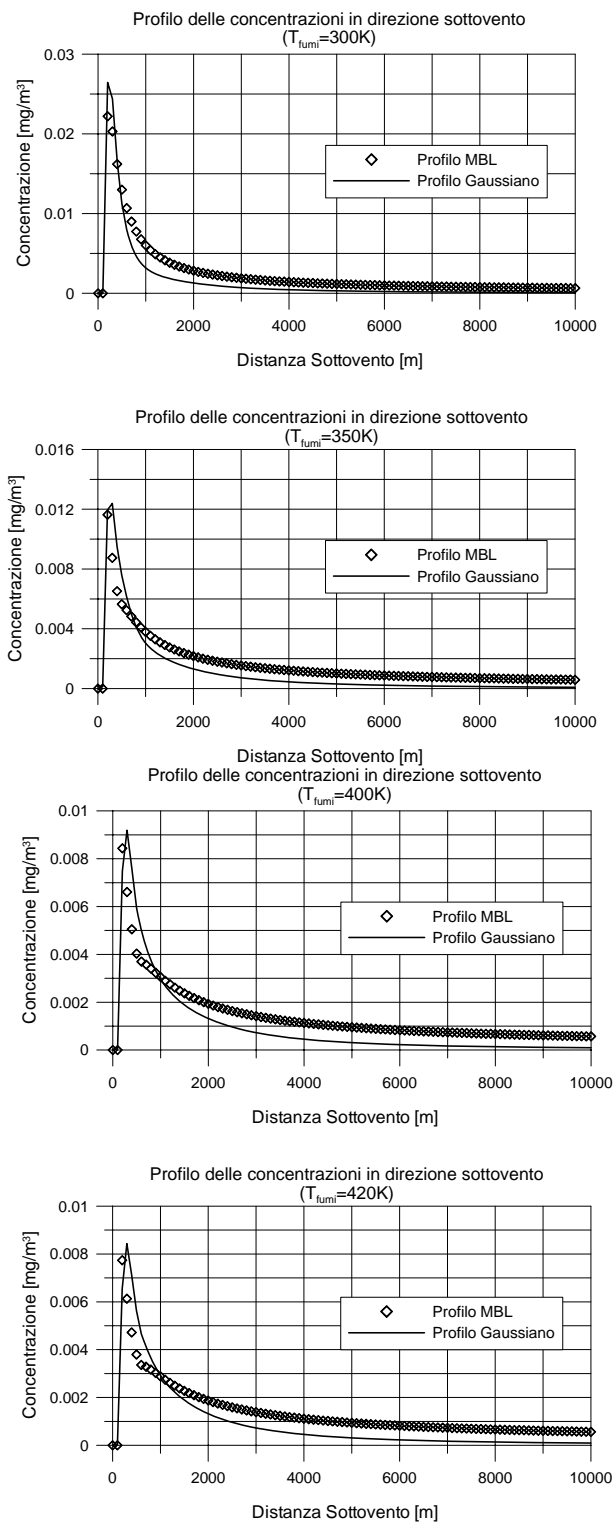


Figura 2 (a-d): Andamento dei profili sottovento delle concentrazioni parametrizzate con la temperatura di uscita dell'inquinante,  $T_{\text{fumi}}$ .

mescolamento; in tal caso si è fatto riferimento per la (12) al metodo delle sorgenti virtuali.

Tabella 2: Caratterizzazione della sorgente per i casi analizzati nell'approccio 3D.

Altezza camino [m]	40.0
Velocità di uscita fumi [m/s]	15.0
Portata inquinante [mg/s]	600.0
Temperatura di uscita fumi [K]	300.0-350.0-400.0-420.0

In tabella (3) sono riportate le caratteristiche meteo-climatiche dei casi analizzati.

Tabella 3: Caratteristiche meteo-climatiche per i casi analizzati nell'approccio 3D.

Velocità media del vento, $\bar{u}$ [m/s]	3.5
Temperatura ambiente [K]	298.15
Grado di stabilità atmosferica Pasquill-Gifford	B
Quota a cui è valutata la concentrazione [m]	5.0
Altezza di mescolamento, $H_m$ [m]	150.0

Le figure (2 a-d) riportano al variare della  $T_{fumi}$  l'andamento della concentrazione della specie inquinante lungo la direzione  $x$  (distanza sottovento): il profilo MBL è quello offerto dalla (11), il profilo gaussiano dalla (12). La previsione offerta dalla (11) appare molto soddisfacente per tutte le distanze considerate: le differenze che si rilevano sono ampiamente contenute all'interno del campo ritenuto significativo di una buona correlazione, figura (3); in tal caso la condizione diventa:

$$0.5 \leq \frac{C(x, t)_{MBL, Eq.(11)}}{C(x, t)_{Gauss. Eq.(12)}} \leq 2$$

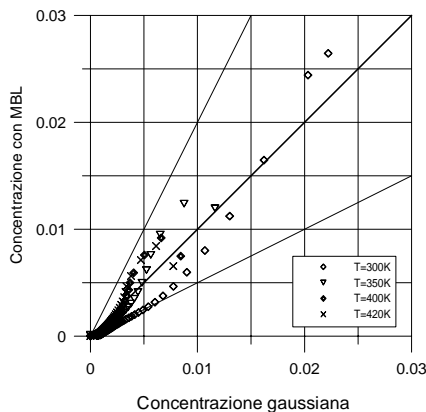


Figura 3: Confronto tra l'andamento gaussiano e quello determinato con MBL.

Al fine di verificare la validità della (11) in altre situazioni meteo-climatiche, il confronto è stato esteso ai casi riportati in tabella (4): è stato fatto riferimento ad una velocità media del vento pari a 5.0 m/s, ed a gradi di stabilità atmosferica di tipo B e D, muovendosi dalla instabilità verso la stabilità atmosferica. La temperatura della specie inquinante è prossima a quella caratteristica di emissioni reali.

La figura (4) evidenzia un forte accordo tra le due espressioni per la concentrazione: ciò vale sia per i valori critici (i valori massimi di concentrazione, a qualche centinaio di metri dalla sorgente), sia per le situazioni di inquinamento a grandi distanze. Un confronto con la figura (2d) consente di poter affermare che all'aumentare della velocità media del

vento i valori offerti dalla (11) sono più prossimi a quelli considerati a riferimento.

Tabella 4: Caratteristiche meteo-climatiche per i casi analizzati nell'approccio 3D.

Velocità media del vento, $\bar{u}$ [m/s]	5.0
Temperatura di uscita fumi [K]	420.0
Grado di stabilità atmosferica Pasquill-Gifford, CS	B-D
Quota a cui è valutata la concentrazione [m]	5.0-7.5
Altezza di mescolamento, $H_m$ [m]	150.0

La figura (5) riporta un confronto tra le due espressioni per un grado di stabilità atmosferica tendente alla neutralità-stabilità; il confronto appare molto soddisfacente a medie e grandi distanze dalla sorgente che, in presenza di un'altezza di mescolamento  $H_m$  pur rendono il calcolo della (11) più complesso. Questa situazione meteorologica, infatti, inibisce la diffusione della specie ad altezze superiori ad  $H_m$  e richiede una riformulazione analitica della (2) e, quindi, della (8) in direzione  $z$ . Per rappresentare tale limite alla diffusione l'andamento della  $FDP_{BL, z}$  (in direzione  $z$ ) è stato posto uguale a zero per altezze superiori ad  $H_m$ : ciò richiede un'opportuna modifica dell'equazione (4).

A distanze più vicine alla sorgente, il confronto appare più critico: il valore massimo della concentrazione viene stimato con un errore del 30% che si riduce a frazioni di punto percentuale già a qualche chilometro di distanza dalla sorgente. Da un più ampio confronto relativo a situazioni di stabilità atmosferica si può desumere che tale qualità di rappresentazione permanga.

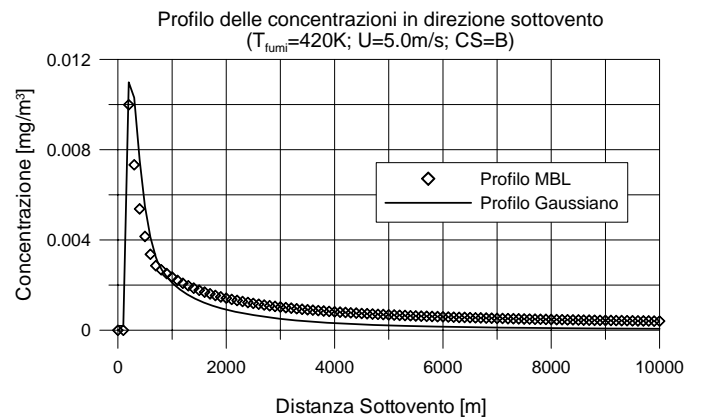


Figura 4: Andamento del profilo sottovento delle concentrazioni con  $T_{fumi} = 420K$ ,  $\bar{u} = 5.0m/s$ ,  $CS = B$ .

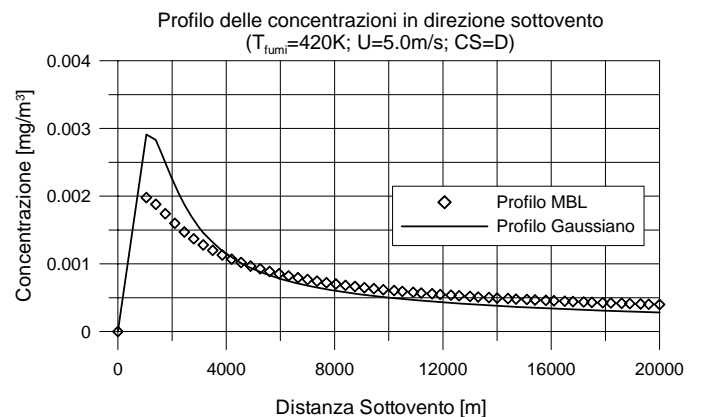


Figura 5: Andamento del profilo sottovento delle concentrazioni con  $T_{fumi} = 420K$ ,  $\bar{u} = 5.0m/s$ ,  $CS = D$ .

## CONCLUSIONI

L'uso di modelli lagrangiani nel calcolo della concentrazione delle specie inquinanti gassose ed inerti in atmosfera pone alcune difficoltà analitiche connesse con la usuale rappresentazione gaussiana per la funzione densità di probabilità di transizione. A fronte di una più efficace rappresentazione dei fenomeni rispetto ad una formulazione euleriana, l'approccio lagrangiano-probabilistico non consente di pervenire a formulazioni analitiche che sono di grande interesse nel settore ingegneristico. Anche in casi relativamente semplici (sorgenti puntiformi, di intensità costante e domini di diffusione mono-dimensionali) si perviene a soluzioni che richiedono il calcolo di funzioni analitiche determinabili in forma discreta.

Il metodo presentato in questo lavoro offre una formulazione alternativa alla funzione densità di probabilità di transizione: essa consiste in una funzione bilaterale di Laplace che, opportunamente condizionata, consente una soluzione analitica per la concentrazione nel caso di sorgenti puntiformi di intensità emissiva comunque variabile nel tempo. Ne scaturisce un importante interesse ingegneristico per lo studio di quelle situazioni di emissione caratterizzate da intensità emissiva tempo dipendente, impulsiva o continua (fenomeni di inquinamento da eventi accidentali o da emissioni industriali stazionarie e non).

La semplice formulazione della bilaterale di Laplace consente di includere agevolmente confinamenti alla diffusione della specie inquinante: è il caso della presenza di altezze di mescolamento atmosferiche o di *barriere* imposte dal suolo o di tipo architettonico.

I risultati presentati in questo lavoro fanno riferimento a domini mono e tri-dimensionali; le situazioni diffusive sono state riferite a condizioni meteo-climatiche ed emissive relative alle sorgenti variabili in un ampio campo di possibilità. La validità della formulazione proposta è stata verificata sulla base di un confronto con quanto offerto da modelli lagrangiano-gaussiani ed euleriano-gaussiani assunti a riferimento.

Il confronto ha mostrato un efficace accordo tra le due formulazioni, nonostante la semplicità computazionale del metodo basato sulla bilaterale di Laplace. In sintesi si può affermare che l'accordo è tanto più preciso all'aumentare della velocità media del vento e per condizioni meteorologiche caratteristiche di neutralità-instabilità.

I risultati ottenuti invitano ad ulteriori approfondimenti che consentano il confronto con dati sperimentali.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Valutazione della dispersione in atmosfera di effluenti aeriformi (Guida ai criteri di selezione dei modelli matematici), Norma UNI 10796, Ottobre 2000.
2. Valutazione della dispersione in atmosfera di effluenti aeriformi (Guida alla selezione dei modelli matematici per la previsione di impatto sulla qualità dell'aria), Norma UNI 10964, Settembre 2001.
3. W. C. Turner, R. S. Frazier, Clean Air Act Amendment Overview and Update, 17° World Energy Congress, ISBN 0-888173-203-6.
4. Appendix W (Guideline on air quality models), EPA guide, sito internet di riferimento: [www.epa.gov/scram001/guidance/guide](http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide).
5. J. H. Seinfeld, Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, Wiley e Sons, 1985.
6. P. Zannetti, Air Pollution Modeling (Theories, Computational Methods, and Available Software), capitoli 2-6-7-8, VNR New York, 1990.
7. E. Foglia, Sviluppo di procedure teoriche per il calcolo della diffusione degli inquinanti in atmosfera, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica, Dipartimento di Ingegneria Meccanica Energetica e Gestionale, Università degli Studi di L'Aquila, 2006.
8. R. Cipollone, E. Foglia, Un nuovo modello per il calcolo delle concentrazioni inquinanti in atmosfera, 61 Congresso Nazionale ATI, settembre 2006.
9. Hanna S. R., Atmos. Environ., 23, 1989.



## DEFINIZIONE DI UN PROTOCOLLO PROCEDURALE PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE FONTI DI EMISSIONE DI PM10

M. Milanese<sup>1</sup>, D. Laforgia<sup>1</sup>, G. Ciccarella<sup>1</sup>, C. Mangia<sup>2</sup>, I. Schipa<sup>2</sup>, A. Tanzarella<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento, <sup>2</sup>Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Sezione di Lecce

### SOMMARIO

L'obiettivo di questo lavoro è la definizione di un protocollo procedurale per l'individuazione delle fonti di emissione di PM10. L'idea di questo studio è nata durante una ricerca condotta nella Provincia di Brindisi, per l'individuazione di eventuali correlazioni tra i superamenti delle concentrazioni di polveri sottili in diversi comuni della provincia e le attività industriali che ivi si svolgono. Sulla base delle analisi effettuate (monitoraggio di emissioni gassose a camino con mezzo mobile in continuo, campionamento del PM10 in aria ambiente, analisi chimica e morfologica dei campioni prelevati, applicazione di modelli di calcolo avanzati per la verifica dell'origine dell'inquinamento atmosferico da PM10) e dei risultati conseguiti, seguendo il protocollo procedurale definito, è stato possibile individuare le correlazioni fra le sorgenti emissive locali e le concentrazioni al suolo di polveri sottili.

### INTRODUZIONE

Il materiale particolato avente un diametro aerodinamico inferiore a 10  $\mu\text{m}$  (PM10) è considerato fra gli indicatori più significativi per i possibili effetti sulla salute umana, causati dalle particelle fini in aria ambiente (WHO [1], [2], Dockery and Pope, [3]; Schwartz, *et al.*, [4]; Maynard & Howard, [5]; Wichmann & Peters, [6]; Chow *et al.*, [7], [8]; Stieb, *et al.*, [9]; Chelani & Devotta, [10]; Querol, *et al.*, [11]. Per tale ragione, sia la natura, sia le sorgenti di particolato sono state investigate in momenti diversi da numerosi ricercatori (Gehriga, *et al.*, [12]; Pillai, Babu & Moorthy, [13]; Chelani, *et al.*, [14]; Marazzan, *et al.*, [15]; Ariola, V., *et al.*, [16].

In Europa, così come del resto negli Stati Uniti, sono stati fissati i valori limite di concentrazione del PM10 in atmosfera ed il numero massimo di superamenti consentiti in un anno (in Italia 50  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  e 35 superamenti/anno consentiti), ma ciò non ha contribuito a mitigare in modo significativo i livelli di inquinamento atmosferico da particolato fine: sia nelle aree urbane densamente popolate, sia in quelle suburbane sono, infatti, frequenti i superamenti di PM10 oltre i limiti di legge.

In accordo con Gehriga, *et al.* [12], al fine di intraprendere un'azione efficace contro l'eccessiva esposizione delle popolazioni ad elevati livelli di PM10, sono state individuate ed analizzate, in modo diretto, le sorgenti di particolato fine quantitativamente significative, presenti nell'area di Brindisi; è stato, inoltre, stimato il peso percentuale delle diverse sorgenti inquinanti, rispetto alle concentrazioni di PM10 rilevate in aria ambiente.

Al fine di conseguire i risultati sopra delineati, in questo lavoro è stato definito un protocollo procedurale per la caratterizzazione quali-quantitativa delle sorgenti di PM10. Il protocollo sviluppato, è stato applicato nell'ambito di uno studio, condotto nella Provincia di Brindisi, per

l'individuazione delle correlazioni tra i frequenti superamenti delle concentrazioni massime consentite, di polveri sottili nel Comune di Torchiarolo, situato a SSE dell'area di Brindisi e le attività industriali che ivi si svolgono. Sulla base delle analisi effettuate (monitoraggio di emissioni a camino con mezzo mobile in continuo, campionamento del PM10 in aria ambiente, analisi chimica e morfologica dei campioni prelevati, applicazione di modelli di calcolo avanzati per la verifica dell'origine dell'inquinamento atmosferico da PM10) e dei risultati conseguiti è stato possibile individuare le correlazioni fra le sorgenti emissive locali e le concentrazioni al suolo di polveri sottili.

La caratterizzazione e la stima del contributo delle diverse sorgenti all'inquinamento da PM10, attraverso l'applicazione del presente protocollo procedurale, può consentire di definire la migliore strategia da sostenere al fine di ridurre al minimo le concentrazioni di particolato fine in aria ambiente.

### DEFINIZIONE DEL PROTOCOLLO

L'analisi dei dati di qualità dell'aria in una centralina di monitoraggio (AQ1), ubicata nella penisola Salentina, ha messo in evidenza il manifestarsi, prevalentemente nei mesi invernali, di numerosi superamenti del valore limite medio giornaliero di PM10, non riscontrabili in altre centraline ubicate nell'area. La centralina è situata in un leggero avvallamento a ridosso del Comune di Torchiarolo (il centro abitato è situato nella direzione Sud rispetto alla centralina).

Il sito risulta sottoposto alla pressione di importanti impianti industriali indicati nella Figura 1, le cui caratteristiche geometriche ed emissive sono riassunte in Tabella 1.

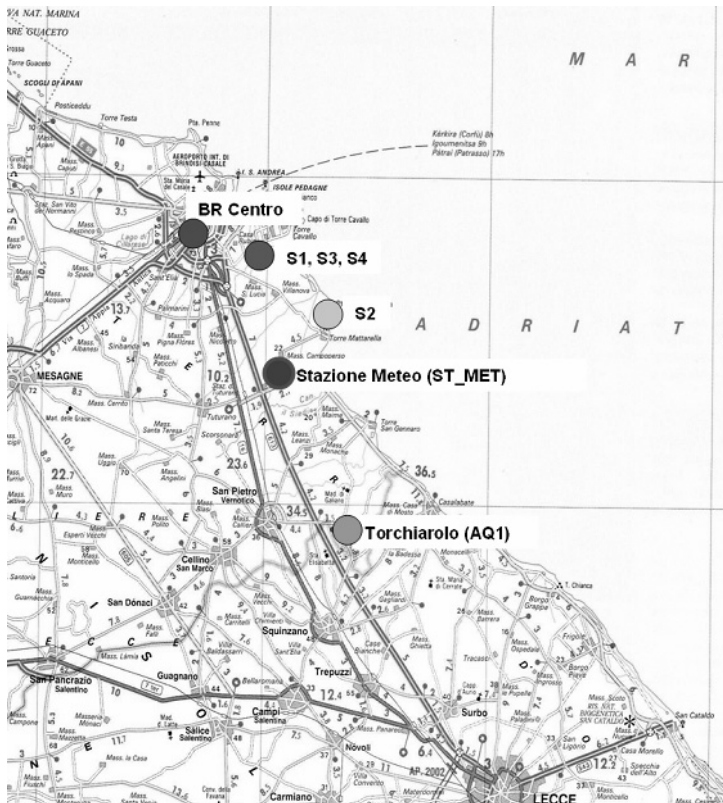


Figura 1. Area di studio con localizzazione della centralina di qualità dell'aria AQ1, della stazione meteorologica (ST\_MET) e degli impianti industriali (S1, S2, S3 e S4)

Tabella 1. Caratteristiche geometriche ed emissive delle sorgenti industriali oggetto del presente studio

SORGENTI INDUSTRIALI	ALTEZZA CAMINO (m)	SO <sub>2</sub> (t/a)	NO <sub>x</sub> (t/a)	PTS (t/a)
S1 (centrale termoelettrica)	60	2.238	3.272	152
S2 (centrale termoelettrica)	200	11.860	9.970	1.052
S3 (centrale termoelettrica)	50	3.600	1.915	133
S4 (inceneritore di rifiuti speciali)	53	1,6	26	1,1

Al fine di valutare l'impatto di tali impianti sull'inquinamento da PM<sub>10</sub>, registrato in AQ1, è stato messo a punto un protocollo procedurale di studio ed analisi, articolato nelle seguenti fasi:

- reperimento ed analisi statistica dei dati storici disponibili:
  - concentrazioni misurate dalle centraline di monitoraggio dell'aria;
  - emissioni delle principali sorgenti inquinanti;
  - dati meteo;
- valutazione del contributo delle sorgenti industriali rispetto alla problematica dei superamenti di PM<sub>10</sub>, mediante un sistema modellistico, in grado di riprodurre, sia la meteorologia, sia la dispersione del particolato di origine primaria e secondaria;
- prelievo di campioni di particolato presso le principali sorgenti emissive e le centraline di monitoraggio della qualità dell'aria, finalizzato a:

- analisi chimica dei campioni di polvere disponibili;
- analisi morfologica e granulometrica dei campioni di polvere disponibili;
- individuazione di eventuali fenomeni meteorologici che si realizzano in modo regolare e ricorrente sul territorio, in grado di influenzare il trasporto di particolato;
- ricerca di specifiche molecole nel PM<sub>10</sub>;
- analisi finale dei risultati ottenuti nei punti precedenti e stima del contributo delle singole fonti, all'inquinamento complessivo da PM<sub>10</sub>.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

Il protocollo per lo studio dell'inquinamento da PM<sub>10</sub> è stato applicato nell'area di Brindisi, al fine di stimare il contributo percentuale delle principali sorgenti emissive presenti nella zona.

Con riferimento al punto 1.1 del protocollo procedurale, l'analisi statistica dei dati storici delle emissioni ha consentito di quantificare l'entità delle stesse nel corso degli anni, individuando eventuali superamenti dei limiti consentiti.

Per l'analisi statistica dei dati storici delle immissioni (punto 1.2), sono stati esaminati i dati raccolti dalla centralina di monitoraggio della qualità dell'aria AQ1 e dalle altre centraline presenti nell'area oggetto di studio. In particolare sono stati analizzati i valori di SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, PTS e PM<sub>10</sub>, registrati negli anni che vanno dal 2002 al 2005. I dati sul PM<sub>10</sub>, oggetto del presente lavoro, disponibili solo da marzo 2005, sono riportati in Figura 2.

Dall'analisi della Figura 2 è possibile ricavare il quadro riassuntivo delle concentrazioni di PM<sub>10</sub> nel corso del 2005, individuando i giorni e i mesi in cui si sono avuti i valori più elevati di concentrazione. Appare evidente, in particolare, un aumento netto, sia del numero di superamenti, sia delle concentrazioni medie di PM<sub>10</sub>, nei mesi invernali, rispetto a quelli estivi.

Per l'analisi statistica dei dati meteo (punto 1.3), sono stati esaminati i registri della stazione meteorologica ST\_MET. Una volta reperiti, i dati grezzi sono stati ordinati e analizzati, seguendo un approccio di tipo statistico. Innanzitutto sono stati analizzati i dati di velocità e di direzione del vento, essendo questi, i due fattori che maggiormente influenzano il trasporto delle polveri. Sono state valutate, allora, le direzioni prevalenti e la curva di distribuzione della velocità (vedasi Figura 3), da cui è emerso che, il vento prevalente nell'area oggetto di studio, è quello proveniente dai quadranti settentrionali (NNW).

Alla luce dei risultati dell'analisi statistica dei dati storici disponibili ed al fine di individuare la direzione prevalente di provenienza del PM<sub>10</sub> registrato dalla centralina AQ1, sono stati diagrammati i valori di concentrazione delle polveri sottili in funzione di velocità e direzione media del vento nelle 24 ore. La Figura 4 e la Figura 5 mostrano la concentrazione del PM<sub>10</sub>, nei giorni di superamento del valore limite, rispettivamente in funzione della velocità e della direzione media del vento nelle 24 ore.

La Figura 6 riporta, invece, i punti di superamento della concentrazione limite di PM<sub>10</sub> nel 2005, come intersezione fra direzione e velocità media del vento nelle 24 ore.

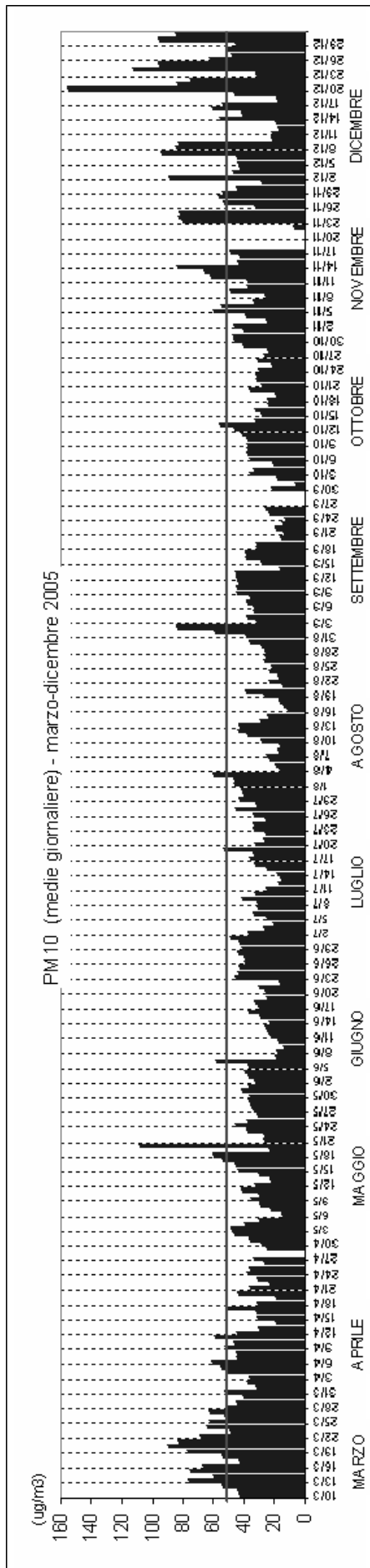


Figura 2. Medie giornaliere relative alla concentrazione di PM10 registrate dalla centralina AQ1 nel periodo marzo-dicembre 2005

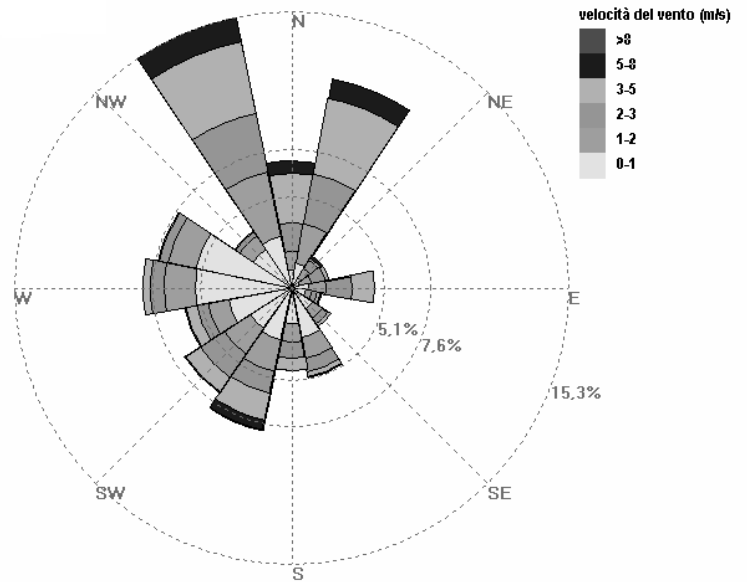


Figura 3. Distribuzione di direzione e velocità del vento secondo i dati registrati della stazione meteorologica ST\_MET

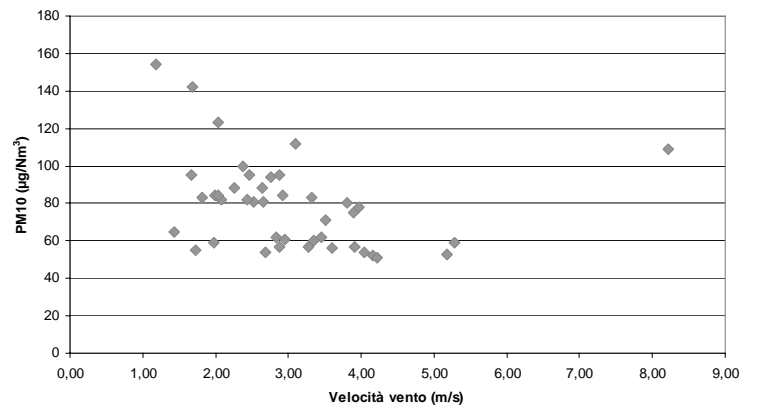


Figura 4. Concentrazione del PM10, nei giorni di superamento del valore limite consentito, in funzione della velocità media del vento nelle 24 ore

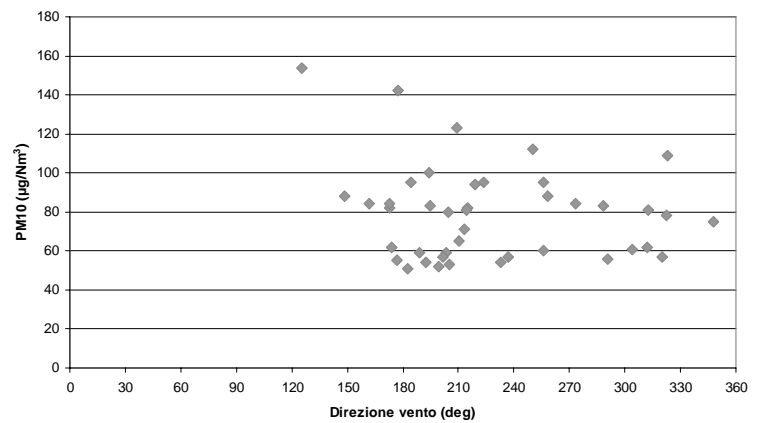


Figura 5. Concentrazione del PM10, nei giorni di superamento del valore limite consentito, in funzione della direzione media del vento nelle 24 ore

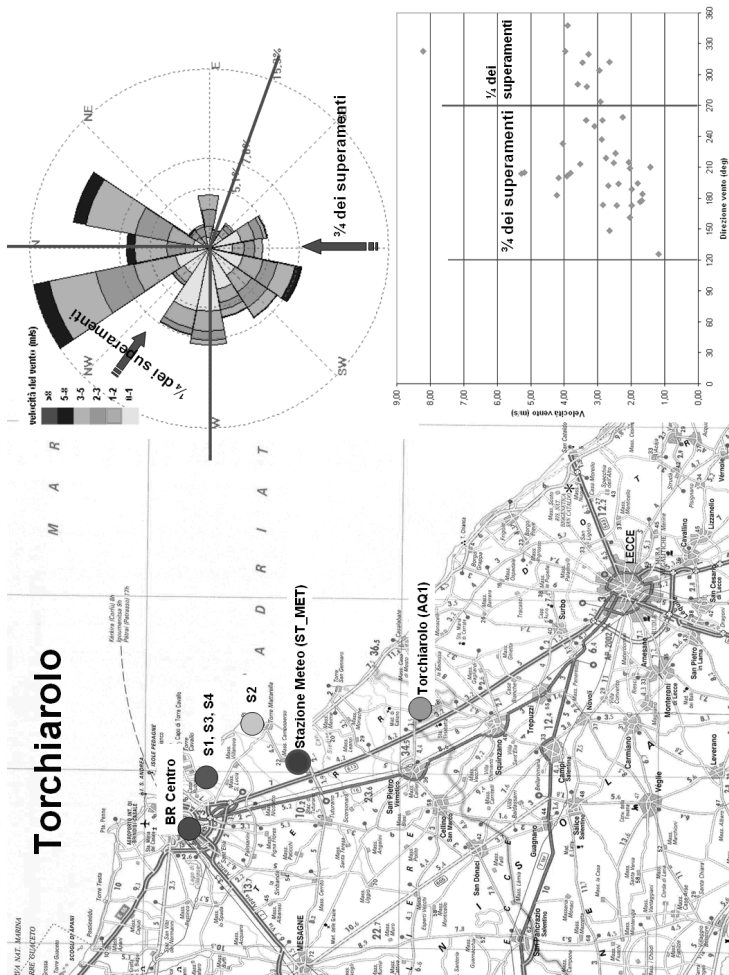


Tabella 2. Setup catena modellistica

CASCATA MODELLISTICA	RAMS	CALMET	CALPUFF
Griglia	3 griglie innestate	Griglia 3: 50x50 $\Delta x=1$ km	Griglia 3: 50x50 $\Delta x=1$ km
Opzioni	Campi di aggiornamento ECMWF	Interpolazione del campo di vento prognostico	Modulo chimico MESOPUFF

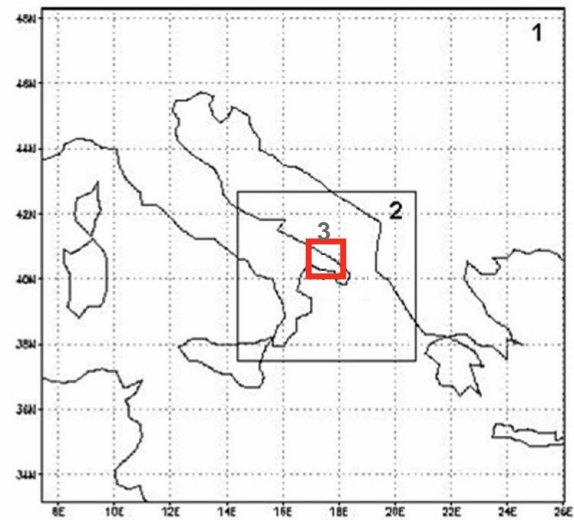


Figura 7. Configurazione delle griglie per le simulazioni

Figura 6. Punti di superamento della concentrazione limite di PM10 nel 2005, come intersezione fra direzione e velocità media del vento nelle 24 ore

Come appare evidente dall'esame della Figura 4, 5 e 6, la maggior parte dei superamenti sulla centralina AQ1, sono stati registrati con vento proveniente dai quadranti meridionali e, dunque, da direzione opposta, rispetto, sia alla zona industriale di Brindisi, sia alla direzione prevalente del vento nell'area. Inoltre, l'analisi dei dati, registrati da altre centraline presenti in zona, ha consentito di mettere in luce frequenti differenze di concentrazione di PM10, fra la centralina AQ1 e le altre stazioni di monitoraggio.

In ragione dei risultati fin qui conseguiti, dunque, ed al contrario di quanto si potesse in prima analisi ipotizzare, già il solo approccio di tipo statistico, ha consentito di evidenziare che, le cause dei superamenti sono da ricercare, anche fuori dell'area industriale di Brindisi.

Lo studio è stato ulteriormente approfondito attraverso il punto 2 del protocollo procedurale. In particolare, per valutare il contributo delle singole sorgenti industriali rispetto alla problematica dei superamenti di PM10, è stato utilizzato il sistema modellistico RAMS2-CALMET3-CALPUFF4 per riprodurre, sia la meteorologia, sia la dispersione del particolato di origine primaria e secondaria. In Tabella 2 e nella Figura 7 è sintetizzato il setup modellistico.

Nel periodo Ottobre-Dicembre 2005 sono stati selezionati due casi di studio (Caso A - 16/10/2005 e Caso B 12/11/2005) caratterizzati da un superamento dei valori limite di PM10 e da condizioni meteorologiche in cui la centralina AQ1 è sottovento alle sorgenti emissive.

In particolare, il Caso A è contraddistinto dall'accensione della sorgente S1, mentre nel Caso B tutte le sorgenti sono a regime. Come input del sistema modellistico, laddove non disponibili i dati di emissione, sono stati utilizzati i valori nominali (Tabella 1).

In Figura 8 sono mostrati i campi di concentrazione relativi al particolato primario e al secondario inteso come somma di nitrati e solfati, per il Caso A e il Caso B. In entrambi i casi è evidente come esista un contributo delle sorgenti S1, S2 ed S3, mentre ininfluente risulta il contributo di S4. Nei casi simulati, inoltre, i valori di concentrazione relativi al particolato secondario risultano sempre maggiori, a volte anche di un ordine di grandezza, rispetto al particolato di origine primaria. La somma dei due contributi risulta, comunque, al di sotto dei valori di PM10 registrati nei 2 periodi dalla centralina AQ1, anche se l'incertezza sulla stima delle emissioni durante l'accensione di S1 non consente di stimare in maniera adeguata l'impatto di tale sorgente.

In definitiva, nelle situazioni in cui il sito di Torchiarolo è risultato essere sottovento gli impianti industriali, le simulazioni hanno evidenziato come sia presente un contributo di tali impianti all'inquinamento, ma tale contributo riesce a spiegare una percentuale molto piccola, tra il 10% e il 20%, di quello che viene misurato dalla centralina AQ1. Viceversa, le simulazioni con vento proveniente dai quadranti meridionali, congiuntamente alle differenze di concentrazione di PM10, che frequentemente si realizzano fra la centralina AQ1 e le altre stazioni di monitoraggio presenti nell'area oggetto di studio, sembrano indicare la presenza di una o più fonti inquinanti locali, situate in direzione S-SW rispetto alla stessa AQ1.

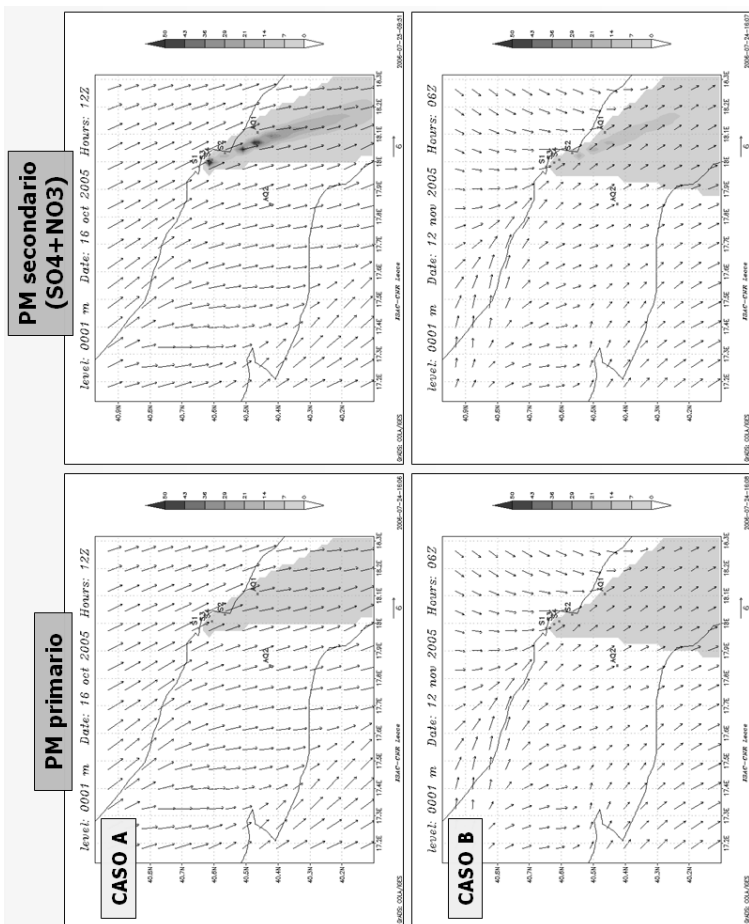


Figura 8. Campo di concentrazione al suolo del PM primario e secondario per i 2 casi di studio

In applicazione del punto 3.1 del protocollo, è stata condotta una campagna di misura relativa all'analisi dei metalli pesanti sui filtri prelevati sia dalla centralina AQ1, sia direttamente ai camini delle principali sorgenti emissive.

Gli elementi oggetto del presente studio sono stati Arsenico, Cadmio, Cobalto, Cromo, Rame, Manganese, Nichel, Piombo, Selenio, Tallio, Vanadio e Zinco. Tali elementi, tipicamente indicati come traccianti per vari processi come ad esempio la combustione del carbone, dell'olio combustibile ed anche emissioni da traffico, sono stati analizzati con la tecnica ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy).

In Figura 9 sono riportati i risultati dell'analisi dei metalli per ciascun filtro prelevato nel periodo Ottobre-Dicembre 2005 dalla centralina AQ1, mentre la Figura 10 riporta il risultato delle analisi dei metalli contenuti nel PM10 campionato presso i camini dei siti oggetto di studio (vedasi Tabella 1, escluso il sito S1 sul quale, per motivi tecnici, non è stato possibile effettuare il campionamento).

Dal grafico di Figura 10 è possibile stabilire alcune caratteristiche univoche che distinguono i diversi siti industriali, infatti:

1. il sito S2 produce un PM<sub>10</sub> in cui si evidenzia una prevalenza di alcuni elementi elencati in ordine di concentrazione, Ni, Zn, Cr, Mn, Se, V, Cu;
2. il sito S3 presenta un particolato contenente, sempre in ordine di concentrazione, Mn, Zn, Ni, Cr, V, Cu, Pb;
3. il sito S4 produce un PM<sub>10</sub> in cui i metalli analizzati risultano presenti in concentrazioni più basse di quelle di S2 ed S3 ed i metalli caratterizzanti risultano essere nell'ordine Zn, Ni, Cr, Pb.

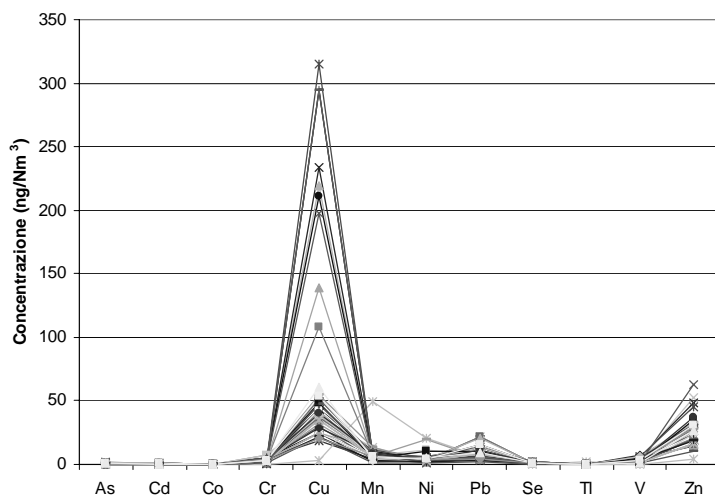


Figura 9. Profilo dei metalli pesanti e del PM10 misurati nella centralina AQ1, durante la campagna sperimentale

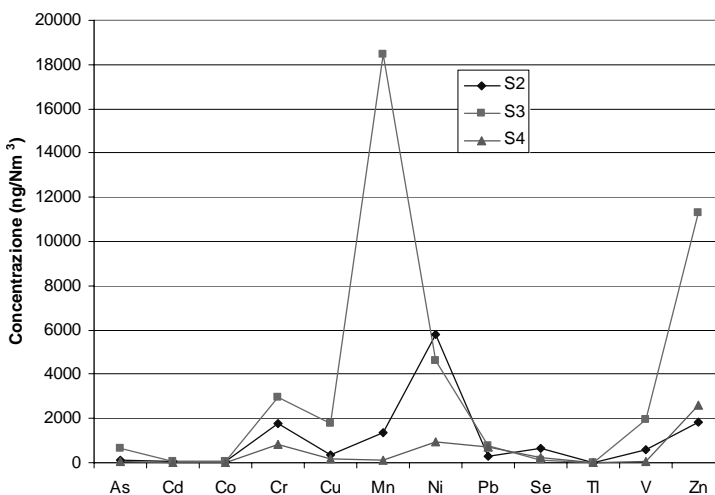


Figura 10. Risultato delle analisi dei metalli contenuti nel PM<sub>10</sub> campionato presso i camini dei siti in Tabella 1, escluso il sito S1 sul quale, per motivi tecnici, non è stato possibile effettuare il campionamento

È importante sottolineare che, l'attività produttiva di S4 è quella di un inceneritore di rifiuti speciali. Dato il particolare ciclo lavorativo, la composizione chimica del PM<sub>10</sub> prodotto è fortemente dipendente dalla natura del materiale incenerito. Stesse considerazioni, anche se con minor peso, devono essere fatte per le due centrali termoelettriche, in quanto, la materia prima impiegata in ambedue i casi è il carbone. Tale combustibile presenta un contenuto di metalli che può cambiare, sia qualitativamente, sia quantitativamente al variare del lotto acquistato.

Dal confronto della Figura 9 con la Figura 10 non emergono profili di concentrazioni e composizione del PM<sub>10</sub> che possano essere adducibili univocamente ad uno dei siti oggetto di campionamento.

In accordo con quanto emerso dall'analisi modellistica, ciò porta a concludere che, le elevate concentrazioni di PM<sub>10</sub> certamente sono da ascrivere ad una serie di concause quali emissioni di altri impianti produttivi, traffico ed emissioni strettamente localizzate di polveri sottili (ad es. caldaie a sansa per il riscaldamento domestico).

L'analisi chimico-morfologica è stata ulteriormente

approfondita attraverso la microscopia elettronica a scansione –SEM (punto 3.2). Le analisi SEM, essendo relativamente rapide e non distruttive, sono considerate l'approccio più immediato per lo studio delle superfici: è per questo motivo che la tecnica SEM può essere applicata efficacemente nell'analisi del PM10. La sonda EDX consente inoltre, qualora necessario, l'analisi elementare delle singole particelle.

Nell'ambito del presente lavoro, una parte dei campioni utilizzati per le analisi chimiche, sono stati sottoposti ad analisi SEM e di seguito si riportano alcune immagini delle polveri campionate ed analizzate (vedasi Figura 11).

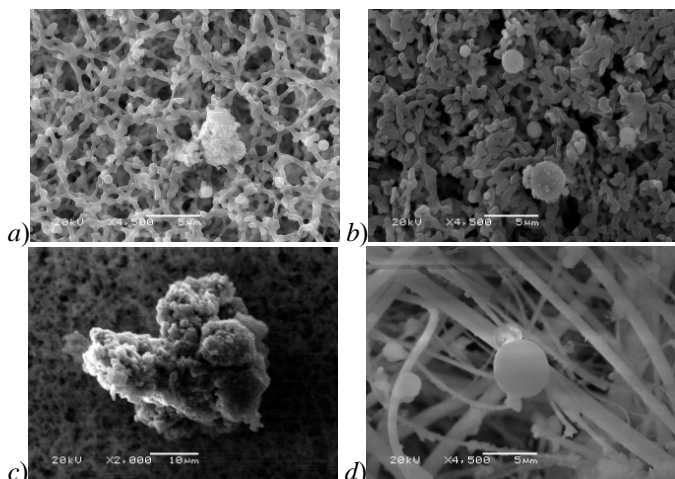


Figura 11. Immagini al SEM di campioni di polveri prelevati presso il sito S2 (foto a), S3 (foto b) S4 (foto c) e AQ1 (foto d)

La Figura 11 (foto a, b e c) evidenzia una morfologia ed una distribuzione granulometrica difficilmente associabile alle polveri prelevate dalla centralina AQ1 (foto d).

Ciò conferma quanto già apparso dall'esame dei risultati delle analisi chimiche, ovvero che non emergono campioni di PM10 che, per morfologia o granulometria, possano essere adducibili univocamente ad uno dei siti oggetto di campionamento.

Gli ultimi tre punti del protocollo procedurale prevedono l'individuazione di eventuali fenomeni meteorologici che si realizzano in modo regolare e ricorrente sul territorio, in grado di influenzare il trasporto di particolato (punto 4), la ricerca di specifiche molecole (punto 5) e l'analisi finale dei risultati ottenuti, finalizzata alla stima del contributo delle singole fonti, all'inquinamento complessivo da PM10 (punto 6).

Gli studi orientati ad evidenziare particolari fenomeni meteorologici (punto 4), risultano talvolta necessari poiché, oltre che dai venti, la dispersione degli inquinanti in aria è determinata anche dai fenomeni di diffusione, dipendenti dalle condizioni di stabilità o instabilità dell'atmosfera, legate alla temperatura dell'aria alle diverse quote.

In accordo con Desideri, *et al.* [17], un valido indicatore per valutare tali fenomeni è la variazione di concentrazione di Radon in atmosfera nell'arco della giornata. In particolare, la riduzione della concentrazione di radon con l'incremento dell'irraggiamento, è indice di un efficiente scambio d'aria verticale, viceversa una concentrazione di radon stabile durante la giornata indica uno scambio d'aria verticale bloccato, ovvero la presenza di fenomeni di ristagno d'aria: ciò può essere causato da uno strato di inversione termica presente ad una certa quota in atmosfera.

Infine, ulteriori approfondimenti dei risultati fin qui

raggiunti possono essere ottenuti mediante il punto 5 del protocollo, ovvero con analisi chimiche finalizzate alla ricerca di specifici marcatori, come ad esempio il retene (usato come indicatore della combustione del legno), il levoglucosio (usato come indicatore della combustione della cellulosa), o altri ancora (Simoneit, *et al.*, [18]).

Nell'ambito del presente lavoro, i punti 4 e 5 del protocollo procedurale non sono stati realizzati, poiché già al termine della terza fase si è ritenuto di avere elementi a sufficienza per l'analisi finale dei risultati e la stima del contributo delle singole fonti, all'inquinamento complessivo da PM10, secondo quanto indicato al punto 6 e sintetizzato nei risultati sopra esposti.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato definito un protocollo procedurale per la caratterizzazione quali-quantitativa delle diverse sorgenti di PM10. Il protocollo sviluppato, è stato applicato nell'ambito di uno studio condotto nella Provincia di Brindisi, per l'individuazione delle correlazioni tra i superamenti delle concentrazioni di polveri sottili in diversi comuni della provincia e le attività industriali che ivi si svolgono. Sulla base delle analisi effettuate e dei risultati conseguiti è stato possibile individuare le correlazioni fra le sorgenti emissive locali e le concentrazioni al suolo di polveri sottili.

Riassumendo quanto precedentemente riportato:

- l'analisi del PM10, nella stazione di Torchiarolo (AQ1) ha evidenziato un andamento stagionale con valori più bassi d'estate e più elevati d'inverno. Le differenze tra la centralina AQ1 e le altre centraline presenti nella zona sembrano indicare l'esistenza di una sorgente locale di PM10 nei mesi invernali a Torchiarolo;
- in riferimento alle relazioni tra i dati registrati e le condizioni anemologiche, anche tenendo conto dell'alta variabilità meteorologica tipica dei mesi invernali, le concentrazioni più elevate di PM10 a Torchiarolo sono per la maggior parte associate a situazioni in cui il vento è di intensità bassa con provenienza dai quadranti occidentali e meridionali;
- le simulazioni hanno riguardato diverse condizioni meteorologiche; in particolare nelle situazioni in cui il sito di Torchiarolo è risultato essere sottovento gli impianti industriali, le simulazioni hanno evidenziato come sia presente un contributo di tali impianti all'inquinamento, ma tale contributo riesce a spiegare una percentuale piccola rispetto a quello che viene misurato a Torchiarolo; viceversa, la presenza di altre possibili fonti di inquinamento, in particolare nelle zone a S-SW di AQ1 è suggerita dai risultati delle simulazioni effettuate.
- le analisi della composizione chimica del PM10 non hanno evidenziato un profilo di concentrazioni e composizione nel PM10 che possa essere adducibile univocamente ad uno dei siti oggetto di campionamento, almeno all'attuale livello di indagine e di significatività dei campioni.

In conclusione, il protocollo procedurale sviluppato nell'ambito del presente lavoro può consentire di ottenere numerosi elementi di analisi che, se ben interpretati e legati insieme, consentono di individuare gran parte delle fonti di emissione responsabili in percentuali diverse di specifiche frazioni del particolato atmosferico. Sarà allora possibile

determinare il peso dato dalle varie fonti al particolato raccolto, o quantomeno avere una visione più completa del fenomeno: in questo modo le autorità competenti avranno un quadro più chiaro della situazione e potranno scegliere meglio quali provvedimenti attuare per il contenimento delle emissioni.

In definitiva, dunque, la caratterizzazione e la stima del contributo delle diverse sorgenti all'inquinamento da PM10 attraverso l'applicazione del presente protocollo procedurale può consentire di definire la migliore strategia da sostenere al fine di ridurre al minimo le concentrazioni di particolato fine in aria ambiente.

## BIBLIOGRAFIA

1. WHO, 2000. Air Quality Guidelines for Europe, World Health Organization; Regional Office for Europe; Copenhagen; 273p; ISBN 92 890 1358 3.
2. WHO, 2005. WHO Air Quality Guidelines; Global Update 2005, World Health Organization; Regional Office for Europe; Copenhagen; 25p; EUR/05/5046029.
3. Dockery, D.W. & Pope, C.A. (1994). Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Ann. Rev. Public Health*, 15, 107-132.
4. Schwartz, J., Dockery, D.W., Neas, L.M., (1996). Is daily mortality associated specifically with fine particles? *Journal of Air and Waste Management Association*, 46, 927-939.
5. Maynard, R.L., Howard, C.V., (1999). Particulate Matter: Properties and Effects upon Health. *Bios Scientific Publisher*, Oxford.
6. Wichmann, H.E., Peters, A. (2000). Epidemiological evidence of the effects of ultrafine particles exposure. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, 358, 2751-2769.
7. Chow, J.C., Engelbrecht, J.P., Freeman, N.C.G., Hashim, J.H., Jantunen, M., Michaud, J.-P., de Tejada, S.S., Watson, J.G., Wei, F., Wilson, W.E., Yasuno, M., Zhu, T., (2002a). Chapter one: exposure measurements. *Chemosphere*, 49, 873-901.
8. Chow, J.C., Engelbrecht, J.P., Watson, J.G., Wilson, W.E., Frank, N.H., Zhu, T., 2002b. Designing monitoring networks to represent outdoor human exposure. *Chemosphere*, 49, 961-978.
9. Stieb, D.M., Judek, S., Burnett, R.T., 2002. Meta-analysis of time-series studies of air pollution and mortality: effects of gases and particles and the influence of cause of death, age, and season. *Journal of Air and Waste Management Association*, 52, 470-484.
10. Chelani, A.B. & Devotta, S. (2005). Impact of Change in Fuel Quality on PM10 in Delhi. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 75, 600-607.
11. Querol, X., Alastuey, A., Viana, M.M., Rodriguez, S., Artinano, B., Salvador, P., Garcia do Santos, S., Fernandez Patier, R., Ruiz, C.R., de la Rosa, J., Sanchez de la Campa, A., Menendez, M., Gil, J.I. (2004). Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in Spain, *Aerosol Science*, 35, 1151-1172.
12. Gehrig, R., Hilla, M., Lienemann, P., Zwicky, C.N., Bukowieck, N., Weingartner, E., Baltensperger, U. & Buchmann, B. (2007). Contribution of railway traffic to local PM10 concentrations in Switzerland, *Atmospheric Environment*, 41, 923-933.
13. Pillai, P.S., Babu, S.S. & Moorthy, K.K. (2002). A study of PM, PM10 and PM2.5 concentration at a tropical coastal station, *Atmospheric Research*, 61, 149-167.
14. Chelani, A.B., Gajghate, D.G., Phadke, K.M., Gavane, A.G., Nema, P. & Hasan, M. Z. (2005). Air Quality Status and Sources of PM10 in Kanpur City, India, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 74, 421-428.
15. Marazzan, G.M., Vaccaro, S., Valli, G. & Vecchi, R. (2001). Characterisation of PM10 and PM2.5 particulate matter in the ambient air of Milan (Italy), *Atmospheric Environment*, 35, 4639-4650.
16. Ariola, V., Alessandro, A.D., Lucarelli, F., Marazzan, G., Mazzei, F., Nava, S., Garcia-Orellana, I., Prati, P., Valli, G., Vecchi, R. & Zucchiatti, A. (2006). Elemental characterization of PM10, PM2.5 and PM1 in the town of Genoa (Italy), *Chemosphere*, 62, 226-232.
17. Desideri, D., Roselli, C., Feduzi, L., Assunta Meli, M. (2006). Monitoring the atmospheric stability by using radon concentration measurements: A study in a Central Italy site, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 270, 523-530.
18. Simoneit, B.R.T., Schauer, J.J., Nolte, C.G., Oros, D.R., Elias, V.O., Fraser, M.P., Rogge, W.F., Cass, G.R. (1999). Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles, *Atmospheric Environment*, 33, 173-182.



## BIODEGRADAZIONE DI PARTICOLATO ATMOSFERICO AD OPERA DI FUNGHI: RISULTATI DI UNO STUDIO SPERIMENTALE NELL'OTTICA DELLE STRATEGIE DI PROTEZIONE AMBIENTALE

Beatrice Moroni<sup>1</sup>, Lucia Pitzurra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Perugia, Piazza Università, Perugia, b.moroni@tiscali.it

<sup>2</sup>Dipartimento di Medicina Sperimentale e Scienze Biochimiche, Sezione Microbiologia,  
Università di Perugia, Via del Giochetto, Perugia

### SOMMARIO

L'obiettivo di questo lavoro è stato il chiarimento di alcuni aspetti della interazione tra microbi e materiali da costruzione in presenza dell'inquinante particolato. A tale scopo sono stati eseguiti test microbiologici in vitro ponendo cellule fungine a contatto di diversi substrati sia inorganici che organici. Gli esperimenti hanno riguardato campioni di pietra in polvere (Scaglia umbra), campioni di particolato atmosferico (PM10) provenienti dalla stazione di monitoraggio di Fontivegge (Perugia) e alcuni composti (grafite, benzene, solfato di ferro e batteri) di particolare rilevanza nell'ambito dello stesso particolato atmosferico. Tutte le categorie di campioni sono state incubate in mezzo acquoso mediante sospensioni fungine preparate utilizzando la più significativa delle specie fungine trovate a Fontivegge (*Aspergillus fumigatus*).

I risultati dei test in vitro hanno dimostrato che i funghi possono efficacemente colonizzare sia i substrati litici che il particolato atmosferico mediante attacco acido della superficie dei minerali e mobilitazione dello zolfo e delle specie metalliche. La cospicua presenza nel particolato atmosferico di diverse specie solfatiche costituisce la premessa essenziale alla proliferazione fungina. Alla luce di queste considerazioni il PM10 può essere considerato un fattore aggiuntivo o, in certi casi, alternativo all'inquinante gassoso nel degrado chimico dei materiali calcarei.

### INTRODUZIONE

Tra le politiche di controllo delle emissioni urbane la progressiva introduzione sul mercato di carburanti a diverso impatto ambientale ha comportato una consistente modificazione nel tempo della composizione chimica dell'atmosfera riassumibile in un netto decremento dei tenori di alcuni composti tra cui anidride solforosa, piombo e benzene e in un significativo incremento dei tenori di altri inquinanti tra cui biossido di azoto e polveri sottili (PM10). A fronte di queste sostanziali modificazioni il dato da rilevare è la persistenza di significativi tassi di corrosione chimica nei materiali esposti all'esterno [1, 2]. Studi recenti condotti dal nostro gruppo di ricerca hanno evidenziato una cospicua crescita fungina e il persistere di processi di solfatazione sulle superfici calcaree a seguito della rimozione dei campioni dall'ambiente esterno e allo stoccaggio in laboratorio in assenza dell'inquinante gassoso [3]. Ciò dimostra l'esistenza di una sinergia tra crescita fungina e accumulo di particolato atmosferico nel promuovere il degrado dei materiali attraverso la biodegradazione dell'inquinante atmosferico da parte della popolazione fungina.

L'obiettivo di questo lavoro è stato il chiarimento di alcuni aspetti della interazione tra funghi e materiali da costruzione in presenza dell'inquinante particolato. A tale scopo sono stati eseguiti test microbiologici in vitro ponendo cellule fungine a contatto di diversi substrati sia inorganici che organici.

### MATERIALI E METODI

Gli esperimenti hanno riguardato campioni di pietra in polvere, campioni di particolato atmosferico e composti opportunamente selezionati da impiegare quale unico mezzo

culturale. Tutte le categorie di campioni sono state incubate in mezzo acquoso mediante sospensioni fungine preparate utilizzando la più significativa delle specie fungine trovate a Fontivegge.

Il calcare utilizzato negli esperimenti appartiene alla Scaglia Rossa del Monte Subasio [4]. Questo calcare è costituito in prevalenza da calcite (96% in peso circa), contiene quarzo e minerali argillosi (Illite e/o illite-montmorillonite) quali fasi accessorie ed è caratterizzato dalla presenza di tracce di un pigmento ematitico disperso nella matrice. Alla presenza di tale pigmento si deve la tipica colorazione rosata di questo materiale.

Il particolato atmosferico impiegato negli esperimenti consiste in campioni di PM10 su filtro in teflon provenienti dalla stazione di rilevamento urbana di Fontivegge. Questa località caratterizzata da scarsa ventilazione e da intenso traffico veicolare è indicativa di un quadro emissivo tipicamente urbano. La composizione del PM10 a Fontivegge, quale individuata nel corso di un lavoro precedente [5], è caratterizzata dalla presenza, in ordine di abbondanza, di idrocarburi, solfati metallici (solfato di zinco idrato ( $ZnSO_4 \cdot nH_2O$ ) e römèrite ( $Fe_3(SO_4)_4 \cdot 14H_2O$ ), solfato e nitrato di ammonio, carbonio elementare, silicati, carbonati e gesso. La componente microbica è caratterizzata da una cospicua presenza di funghi filamentosi appartenenti ai generi *penicillium*, *alternaria*, *cladosporium* e *aspergillus* e inoltre dalla presenza di batteri Gram<sup>+</sup> (cocchi e bacilli). Allo scopo di stabilire l'influenza della tipologia e dell'abbondanza dell'inquinante particolato sullo sviluppo della popolazione fungina quattro diverse componenti del PM10 tra quelle individuate nelle indagini preliminari, e precisamente carbone, benzene, solfato di ferro e batteri, sono state selezionate per essere impiegate negli esperimenti quale unico mezzo culturale. Queste componenti sono state impiegate sotto forma

Tabella 1: Valori (medie aritmetiche) della crescita microbica (MG; UFC/ml) e del pH registrati nei campioni di polvere di roccia e di PM10 incubati con *Aspergillus fumigatus* ( $10^4$  e  $5 \cdot 10^4$  UFC/ml) a diversi tempi di esposizione

Tempo (giorni)		0	7	15	30				
<i>A. fum.</i>	MG	10000	50000	7900	39500	4000	20000	8000	40000
	pH	5.54	5.40	5.36	5.39	5.27	5.62	5.48	5.68
<i>A. fum.</i> + PM10	MG	10000	50000	6700	845	14000	158150	7000	143750
	pH	7.03	6.80	8.10	7.03	7.41	7.03	6.32	6.70
<i>A. fum.</i> + Scaglia	MG	10000	50000	14600	73000	24000	120000	40000	150000
	pH	9.01	9.05	8.94	8.83	8.86	8.56	8.20	8.35
<i>A. fum.</i> + Scaglia + PM10	MG	10000	50000	15000	4715	18000	204900	30000	146750
	pH	8.90	9.05	9.02	9.08	8.94	8.70	8.30	8.25
Campioni di controllo (pH)		0	7	15	30				
	PM10	7.31	6.95	6.89	6.83				
	Scaglia	9.26	8.77	8.42	8.26				

dei seguenti composti: grafite (polvere, Alpha AESAR), benzene ( $C_6H_6$ , liquido, Panreac), solfato di ferro ( $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ , polvere, Carlo Erba) e *Stafilococcus aureus* (sospensione acquosa).

Sono state eseguite due serie di esperimenti. Nella prima serie campioni di polvere di roccia (40 mg/ml) e di PM10 (0.04 mg/ml) sono stati incubati in sospensione acquosa con *Aspergillus fumigatus* a due diverse concentrazioni ( $10^4$  e  $5 \cdot 10^4$  UFC/ml). Ciò allo scopo di evidenziare, rispettivamente, il ruolo del substrato lapideo e l'influenza della concentrazione fungina sulla entità della crescita microbica. Sono stati inoltre preparati campioni di confronto di polvere di roccia e di PM10 in assenza di cellule fungine. Nella seconda serie di esperimenti sospensioni acquose di grafite (0.02 mg/ml), benzene (0.02 mg/ml), solfato di ferro (0.02 mg/ml) e di *Stafilococcus aureus* ( $10^3$  UFC/ml) sono state incubate con *Aspergillus fumigatus* ( $10^4$  UFC/ml). Ciò allo scopo di valutare l'influenza delle specifiche componenti del particolato atmosferico nei riguardi della proliferazione fungina. Tutte le miscele sono state incubate a 25°C e i test sono stati ripetuti per tre volte.

A diversi tempi di esposizione (7, 15 e 30 giorni) i campioni sono stati prelevati e sottoposti a monitoraggio microbico e a misura del pH. Per il monitoraggio microbico aliquote di 100 µl sono state prelevate dalle sospensioni e sottoposte a diluizioni seriali per essere poi trasferite su piastre di coltura specifiche per funghi (Agar Sabouraud) e batteri (Mannitol salt). Dopo un periodo di incubazione di 5/6 giorni a 25°C le colonie fungine sono state contate e i risultati espressi come unità formanti colonie (UFC/ml). La misura del pH è stata eseguita presso ARPA Umbria, Dipartimento di Perugia, mediante pHmetro (PHM 95, Radiometer). Le misure sono state eseguite alla temperatura di 25°C. La precisione analitica è risultata essere minore del 2% nel range di misura adottato.

## RISULTATI SPERIMENTALI

Nei test sperimentali eseguiti incubando il particolato atmosferico con le due sospensioni fungine a titolo diverso (Tab. 1) ciò che si osserva è un netto decremento seguito da una veloce ripresa della proliferazione microbica nei test eseguiti alla più alta concentrazione della sospensione fungina, e valori praticamente immutati della entità della colonizzazione microbica nei test eseguiti alla concentrazione

inferiore della sospensione fungina. I valori iniziali del pH registrati in presenza della sola sospensione fungina subiscono un repentino incremento a seguito dell'introduzione del particolato atmosferico passando da 5.54 a 7.03 in un caso, e da 5.40 a 6.80 nell'altro caso. L'andamento del pH nel corso degli esperimenti appare invece condizionato dalla concentrazione della sospensione fungina impiegata. Infatti i valori del pH risultano praticamente immutati (cioè entro il limite dell'errore analitico) negli esperimenti eseguiti alla concentrazione maggiore della sospensione fungina, e mostrano un repentino incremento seguito da un lento decremento negli esperimenti eseguiti alla concentrazione inferiore. In quest'ultimo caso, in particolare, il coefficiente di variazione del pH è pari all'8.9% e supera quindi significativamente la variazione di pH registrata nello stesso intervallo di tempo sui campioni di controllo di PM10 in assenza del contaminante biologico (valori pari al 2.7%).

L'aggiunta di polvere di roccia ai campioni costituiti da funghi e particolato atmosferico comporta l'instaurarsi di livelli di colonizzazione microbica superiori a quelli registrati in presenza di solo PM10. Occorre inoltre segnalare la persistenza di un periodo iniziale di sensibile decremento della popolazione fungina alla più alta concentrazione della sospensione impiegata. I valori del pH si abbassano significativamente nel corso degli esperimenti a prescindere dalla concentrazione della sospensione fungina impiegata. La variazione di pH misurata al termine degli esperimenti è comunque inferiore alla variazione registrata nei campioni di controllo di Scaglia in polvere.

Nei campioni sperimentali costituiti dalla associazione funghi-polvere di roccia a diversa concentrazione della sospensione fungina un certo incremento della popolazione microbica si verifica ad entrambe le concentrazioni sperimentali impiegate ma i corrispondenti valori del pH sono del tutto simili a quelli registrati nei campioni sperimentali costituiti dalla associazione funghi-PM10-polvere di roccia. La variazione di pH misurata al termine degli esperimenti è anche in questo caso inferiore alla variazione registrata nei campioni di controllo di Scaglia in polvere.

I risultati dei test microbiologici eseguiti sui diversi substrati organici ed inorganici selezionati (Tab. 2) evidenziano diversi andamenti della crescita fungina in funzione della tipologia di substrato impiegata quale mezzo colturale. Infatti i livelli di contaminazione microbica mostrano un incremento significativo negli esperimenti eseguiti su solfato di ferro, risultano sostanzialmente immutati

sulla grafite e sulla sospensione di *Stafilococcus aureus*, e subiscono un rapido decremento sul benzene. I valori di pH si mantengono molto bassi nel sistema solfato-funghi mentre tendono ad approssimare i valori misurati sulle sospensioni fungine in assenza di mezzo culturale (*A. fum.* in Tab. 1) nelle altre tipologie di test microbiologici.

Tabella 2. Valori (medie aritmetiche) della crescita microbica (MG; UFC/ml) e del pH registrati nei campioni costituiti dalle componenti selezionate del PM10 incubate con *Aspergillus fumigatus* ( $10^4$  CFU/ml) a diversi tempi di esposizione

Tempo (giorni)		0	7	15	30
Grafite	MG	10000	16350	21500	15500
	pH	8.08	5.42	5.27	5.32
Benzene	MG	10000	19600	5000	4000
	pH	7.27	5.42	5.09	5.15
Solfato di ferro	MG	10000	31500	25000	5000
	pH	2.90	2.90	2.94	2.69
<i>Stafilococcus aureus</i>	MG	10000	12200	14000	5000
	pH	5.56	5.41	5.49	5.32

## DISCUSSIONE

### Fattori limitanti: PM10 e substrato calcareo

Gli esperimenti eseguiti in presenza di solo PM10 evidenziano due diversi andamenti della crescita microbica in funzione della concentrazione della sospensione fungina impiegata negli esperimenti. Più precisamente, mentre alla concentrazione inferiore della sospensione fungina si osserva un prolungato periodo di induzione caratterizzato dalla totale assenza di crescita fungina, alla concentrazione superiore si osserva una fase iniziale caratterizzata da un elevato tasso di mortalità seguita da una repentina fase di crescita esponenziale della popolazione fungina (Fig. 1). Queste osservazioni evidenziano il ruolo preminente della concentrazione iniziale delle cellule fungine quale agente colonizzante rispetto a quello del PM10 quale nutriente nella evoluzione del processo di colonizzazione microbica.

Quando la popolazione fungina è troppo abbondante nell'ambiente di crescita la colonia va incontro ad un periodo iniziale caratterizzato da un elevato tasso di mortalità. La mortalità di parte della colonia e il rinnovamento statistico degli individui cellulari sembrerebbero rappresentare la condizione necessaria alla sopravvivenza dell'intera colonia. La mortalità non sembra da porre in relazione semplicemente con la carenza di nutrienti dal momento che la sospensione fungina in assenza di nutrienti mostra un persistente periodo di induzione per l'intera durata degli esperimenti (cfr. *A. fum.* in Tab. 1). Né è possibile invocare una azione tossica da parte del filtro in teflon di supporto al PM10 dal momento che non si rileva alcun incremento del tasso di mortalità alla concentrazione inferiore della sospensione fungina (cfr. Tab. 1). Più verosimilmente occorre considerare l'esistenza di un periodo iniziale di transizione in cui si verificano contemporaneamente la mobilizzazione dei singoli costituenti del PM10 nel mezzo acquoso e il progressivo adattamento fisiologico della popolazione fungina alle condizioni chimico-fisiche risultanti. La crescente disponibilità di nutrienti inorganici in questo periodo è peraltro ben evidenziata

dall'aumento dei valori del pH nei campioni di controllo di PM10 (cfr. Tab. 1). Gli esperimenti dimostrano che la durata di questo periodo di transizione dipende dalla concentrazione della sospensione fungina, e cioè maggiore è il numero delle cellule fungine incubate minore è la durata del periodo di induzione o del periodo ad elevato tasso di mortalità della colonia a favore di una più rapida transizione verso la fase di crescita esponenziale. In particolare, i dati sperimentali evidenziano che è necessario raggiungere un numero minimo di cellule fungine (corrispondente, nel nostro caso, ad un rapporto nutrienti/UFC inferiore a  $1.5/10^{-5}$  mg/UFC) per attivare la transizione dalla fase di induzione a quella esponenziale.

L'aggiunta di polvere di Scaglia al PM10 quale substrato nutriente fa registrare una crescita, lenta ma progressiva, della popolazione fungina alla più bassa concentrazione della sospensione utilizzata, e la persistenza di una fase iniziale ad elevato tasso di mortalità seguita da una rapida ripresa della crescita fungina alla più alta concentrazione. Queste osservazioni evidenziano il ruolo preminente del substrato lapideo rispetto a quello del particolato atmosferico nel favorire lo sviluppo della popolazione fungina. L'attitudine della Scaglia a sostenere la crescita fungina, già evidenziata nel corso di precedenti studi sperimentali [3], è da porre in relazione con la presenza, seppur modesta, della frazione argillosa all'interno della pietra ed è provocata dalla mobilizzazione dei metalli (Na, K, Mg, Fe) quali nutrienti essenziali [e.g. 6, 7, 8, 9]. La presenza di tracce di ematite nella pietra può essere considerata un ulteriore fattore predisponente la crescita fungina considerata l'attitudine di *Aspergillus fumigatus* a provocare la rimozione di  $Fe^{3+}$  dalla superficie dei minerali [10, 11].

Quando la popolazione fungina è posta ad interagire con la polvere di roccia quale unico mezzo culturale l'andamento della crescita microbica risulta indefinitamente crescente tanto che risulta difficile evidenziare, e quindi distinguere tra loro, la fase induttiva da quella di crescita esponenziale. La velocità di crescita corrispondente tende ad aumentare nei primi quindici giorni dall'inizio degli esperimenti per poi mantenersi costante fino al termine degli stessi (Fig. 1). Il fatto che la velocità di crescita microbica registrata in presenza della

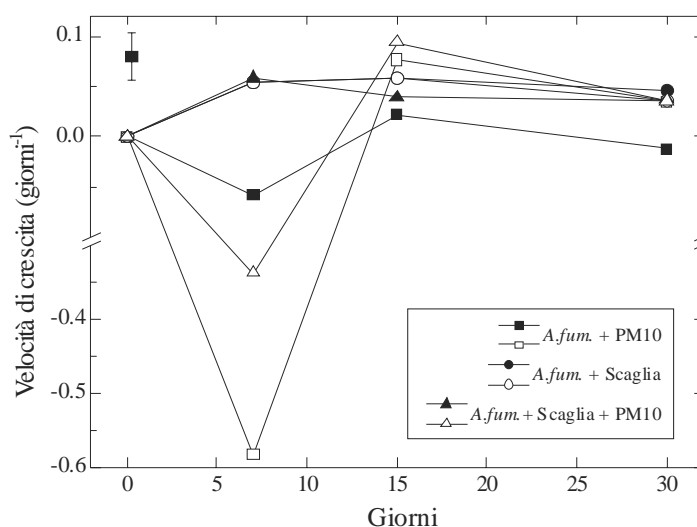


Figura 1. Grafico della velocità di crescita microbica su particolato atmosferico e su polvere di roccia alla concentrazione di  $10^4$  UFC/ml (simboli pieni) e di  $5 \cdot 10^4$  UFC/ml (simboli vuoti) della sospensione fungina impiegata.

polvere di roccia sia pressoché la stessa ad entrambe le concentrazioni delle sospensioni fungine impiegate dimostra in modo chiaro il ruolo preminente del substrato lapideo quale fattore limitante la crescita fungina.

### **Fattori limitanti all'interno del PM10: solfati metallici e composti organici**

Tra i diversi composti organici e inorganici impiegati negli esperimenti il solfato di ferro è l'unico a far registrare un marcato effetto positivo nei confronti dello sviluppo della popolazione fungina. I valori estremamente bassi del pH caratterizzanti il sistema solfato-funghi rappresentano senz'altro un fattore ambientale altamente selettivo nei confronti della proliferazione di numerosi microrganismi tra cui i batteri. Questo fatto evidenzia le notevoli potenzialità dei funghi quali agenti colonizzatori.

Riguardo agli altri composti, la grafite e la popolazione batterica non mostrano alcuna azione diretta sulla entità della colonizzazione fungina al contrario del benzene che invece rivela una azione addirittura tossica nei confronti dei funghi. Il fatto che il benzene, pur essendo un costituente di rilievo del particolato atmosferico, non risulti tra le componenti utilizzate dai funghi per la propria crescita può dipendere da una generale incompatibilità degli organismi colonizzanti nei confronti di tale composto. Questa ipotesi è suffragata dai risultati di altri studi da cui risulta come gli idrocarburi policiclici aromatici, tra cui il benzene, non vengano generalmente utilizzati dagli organismi colonizzanti [12]. In alternativa, tale comportamento può dipendere dall'impiego di tenori assoluti di benzene superiori a quelli effettivamente tollerati dai funghi.

I funghi sono organismi chemoeterotrofi capaci di acquisire i nutrienti essenziali per la propria crescita direttamente dalla superficie dei minerali dove tali nutrienti si trovano utilmente concentrati rispetto ai tenori medi dell'ambiente circostante [13]. In particolare, essi tendono ad assimilare lo ione solfato rilasciato dai minerali per effetto dell'alterazione superficiale incorporandolo in una varietà di forme organiche tra cui alcune proteine, vitamine e ormoni [7, 8, 14]. Anche il Fe e lo Zn sono micronutrienti essenziali alla crescita fungina. Lo Zn, in particolare, è un componente funzionale di una varietà di fattori di trascrizione e di metalloenzimi che vanno da quelli coinvolti nel metabolismo intermedio a quelli interessati alla sintesi degli acidi nucleici. La mancanza di questo catione dal mezzo colturale può pertanto comportare numerose conseguenze fisiologiche come la diminuzione della sintesi di DNA, RNA e di proteine o addirittura la diminuzione del numero di mitocondri. Studi sperimentali hanno evidenziato come la crescita di numerose specie di *Aspergillus* possa essere efficacemente contrastata proprio introducendo nell'ambiente colturale un deficit di questo elemento chimico [15]. Queste considerazioni, suffragate dai risultati sperimentali, evidenziano il ruolo preminente della componente solfatica di origine abiologica quale fattore limitante la crescita fungina. La presenza nel particolato atmosferico di diverse specie solfatiche, metalliche e non (solfato di ammonio, gesso, solfati di ferro e zinco), costituisce pertanto una premessa essenziale alla proliferazione fungina.

### **I funghi come agenti biodeteriogeni della pietra**

Lo sviluppo della popolazione fungina si associa frequentemente ad una generale acidificazione del

microambiente circostante mediante la secrezione di acidi organici e inorganici quali prodotti metabolici [7, 8, 9, 16, 17]. I test sperimentali hanno, effettivamente, fatto registrare una significativa diminuzione del pH in tutti i casi tranne che negli esperimenti condotti in presenza di solo PM10 utilizzando la sospensione fungina a titolo maggiore. In questo caso la sostanziale stabilità del pH è da mettere in relazione con la drastica riduzione iniziale della popolazione fungina indotta dalle necessità di adattamento fisiologico della colonia alle condizioni chimico-fisiche ambientali.

La secrezione di acidi organici quali prodotti metabolici può contribuire all'alterazione delle rocce calcaree attraverso la dissoluzione della frazione carbonatica e la successiva riprecipitazione del calcio sotto forma di ossalato o di carbonato [18]. L'effettiva presenza sui filamenti fungini di mineralizzazioni contenenti calcio quale rilevata all'esame al SEM di campioni di Scaglia tenuti preliminarmente esposti all'esterno nel sito di campionamento del PM10 (Fig. 2) conferma la consistenza di questo processo di alterazione nel caso in esame.

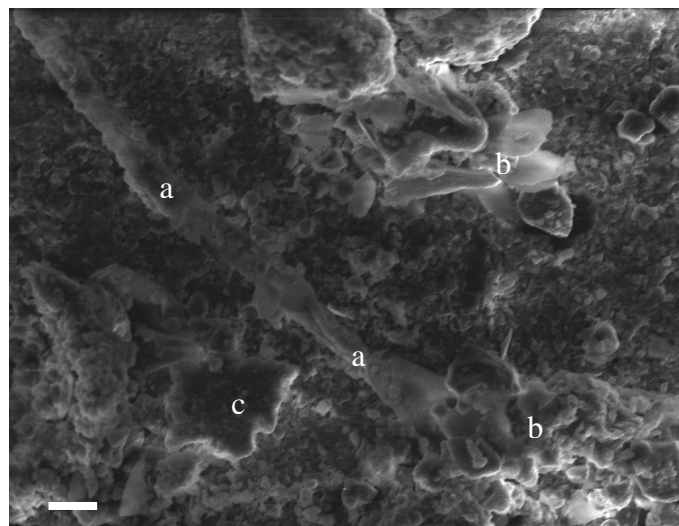


Figura 2. Iife fungine mineralizzate (a), depositi gessosi (b) e corrosione chimica del substrato circostante (c). La barra di scala misura 50  $\mu$ m.

### **CONCLUSIONI**

I risultati dei saggi sperimentali in vitro dimostrano che i funghi possono efficacemente colonizzare sia i substrati litici che il particolato atmosferico mediante attacco acido della superficie dei minerali e mobilizzazione dello zolfo e delle specie metalliche. La presenza nel substrato calcareo di minerali contenenti metalli (minerali argillosi, ematite), e la presenza nel particolato atmosferico di diverse specie solfatiche, metalliche e non (solfato di ammonio, gesso, solfati di ferro e zinco), rappresentano pertanto una condizione necessaria allo sviluppo della popolazione fungina.

In merito al ruolo dei singoli fattori limitanti i risultati della sperimentazione evidenziano il ruolo preminente del substrato lapideo nel favorire la crescita fungina. Un ruolo minoritario nella attivazione della colonizzazione microbica spetta, nel lungo termine, al particolato atmosferico quando questo si trova associato al substrato lapideo nell'ambiente di reazione. In quest'ultimo caso va inoltre registrato l'effetto aggiuntivo della concentrazione della sospensione fungina sulla crescita

microbica per valori del rapporto UFC/PM10 superiori ad un valore di soglia dipendente dalle condizioni sperimentali. In questi termini la presenza di particolato atmosferico sulla superficie della pietra esposta all'esterno, per quanto non particolarmente efficace in termini di proliferazione biologica nel breve periodo, può costituire un fattore di degrado aggiuntivo o, per certi versi, alternativo all'inquinante gassoso nel degrado chimico delle pietre calcaree.

Alla luce di queste considerazioni un efficace controllo dei meccanismi di degrado delle superfici architettoniche può essere perseguito operando da un lato in modo da ridurre la reattività del materiale lapideo, dall'altro cercando di inibire dell'accumulo meccanico di particolato sulle superfici esposte. Queste considerazioni ampliano significativamente le prospettive di ricerca nel settore dei prodotti per la conservazione e il trattamento dei materiali esposti all'esterno.

## RINGRAZIAMENTI

Le autrici ringraziano sentitamente M. Areni e F. Archinucci di ARPA Umbria, Dipartimento di Perugia, per il valido supporto tecnico nelle fasi di campionamento del PM10 e di misurazione del pH. Si ringrazia inoltre il Consorzio Cresci che ha finanziato la ricerca.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. S.T. Trudgill, H.A. Viles, R. Inkpen, C. Moses, W. Gosling, T. Yates, P. Collier, D.I. Smith and R.U. Cooke, Twenty-year weathering remeasurements at St Paul's cathedral, London, *Earth Surf Proc Land*, vol. 26, pp. 1129-1142, 2001.
2. P. Brimblecombe, *The Effects of Air Pollution on the Built Environment*, Imperial College Press, London, 2003.
3. B. Moroni, L. Pitzurra and G. Poli, Microbial growth and air pollutants in the corrosion of carbonate building stone: results of laboratory and outdoor experimental tests, *Env. Geol.*, vol. 46, pp. 436-447, 2004.
4. P. Fazzini P and M.P. Mantovani, La geologia del gruppo di M. Subasio, *Boll. Soc. Geol. It.*, vol. 84, pp. 71-142, 1965.
5. B. Moroni, L. Pitzurra, M. Areni, N. Barbagianni, E. Peirone, M. Pompei, G. Marchetti and G. Poli, Caratterizzazione chimico-fisica del particolato fine nell'atmosfera urbana di Perugia: risultati preliminari e prospettive di ricerca, *Atti del VI Congresso Nazionale CIRIAF*, pp. 379-384, 2006.
6. K. Sterflinger, Fungi as geologic agents. *Geomicrob. J.*, vol. 17, pp. 97-124, 2000.
7. W. Burgstaller and F. Schinner, Leaching of metals with fungi. *J. Biotechnol.*, vol. 27, pp. 91-116, 1993.
8. G.M. Gadd, Fungal production of citric and oxalic acid: importance in metal speciation, physiology and biogeochemical processes, *Adv. Microb. Phys.*, vol. 41, pp. 47-92, 1999.
9. G.M. Gadd, Metal transformations, in G.M. Gadd (ed.), *Fungi in bioremediation*, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
10. G. Callot, M. Marette, L. Pottier and A. Dubois, Biogenic etching of microfractures in amorphous and crystalline silicates, *Nature*, vol. 328, pp. 147-149, 1987.
11. A.H.T. Hissen, J.M.T. Chow, L.J. Pinto and M.M. Moore, Survival of *Aspergillus fumigatus* in serum involves removal of iron from transferrin: the role of siderophores, *Infect. Immun.*, vol. 72, pp. 1402-1408, 2004.
12. E. Zanardini, P. Abbruscato, N. Ghedini, M. Realini and C. Sorlini, Influence of atmospheric pollutants on the biodeterioration of stone, *Int. Biodet. Biodeg.*, vol. 45, pp. 35-42, 2000.
13. R.M. Atlas and R. Bartha, *Microbial ecology: fundamentals and applications*, Cummings Science Publishing, Redwood City, 1998.
14. E.P. Burford, M. Fomina and G.M. Gadd, Fungal involvement in bioweathering and biotransformation of rocks and minerals, *Min. Mag.*, vol. 67, pp. 1127-1155, 2003.
15. M.O. Garraway and R.C. Evans, *Fungal nutrition and physiology*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
16. H.L. Ehrlich, *Geomicrobiology*, Marcel Dekker, New York, 1996.
17. A. Jarosz-Wilkolazk and G.M. Gadd, Oxalate production by wood-rotting fungi growing in toxic metal-amended medium, *Chemosphere*, vol. 52, pp. 541-547, 2003.
18. H.J. Arnott, Calcium oxalate in fungi, in S.R. Khan (ed.), *Calcium oxalate in biological systems*, CRC Press, Boca Raton, 1995.



## CARATTERI MORFOCHIMICI DI POLVERI SOTTILI IN ALCUNE REALTA' UMBRE: I CONTESTI URBANI DI PERUGIA E TERNI

Beatrice Moroni

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Perugia  
Piazza Università, 06123 Perugia, b.moroni@tiscali.it

### SOMMARIO

Vengono illustrati i risultati preliminari di uno studio morfochimico del particolato fine proveniente dai contesti urbani dei capoluoghi umbri. Nel corso di tale studio sono stati esaminati in maniera sistematica campioni selezionati di PM10 provenienti dalle postazioni di monitoraggio ambientale delle città di Perugia (Fontivegge) e di Terni (Via F. Cesi). I campioni sono stati osservati in microscopia elettronica a scansione (SEM) e sottoposti ad esame morfometrico completo mediante analisi di immagine (IA) e ad analisi chimica delle singole particelle mediante microanalisi a dispersione di energia (EDS). I dati morfometrici e composizionali sono stati elaborati allo scopo di stabilire eventuali correlazioni tra classi dimensionali e corrispondenti dati geochimici.

I risultati ottenuti evidenziano differenze sostanziali in termini sia morfometrici che composizionali tra i campioni di Perugia e quelli di Terni. Tali differenze permettono di delineare due diversi contesti emissivi, e precisamente un quadro influenzato in maniera preponderante dal traffico veicolare nel caso di Perugia e un quadro caratterizzato in egual misura dalle sorgenti naturali e dalle emissioni industriali nel caso di Terni.

### INTRODUZIONE

Per contribuire alla comprensione degli effetti del particolato sull'ambiente e sull'uomo e concorrere al raggiungimento degli obiettivi di qualità dell'aria fissati dalle direttive europee è necessario esaminare contestualmente le caratteristiche morfometriche e chimiche del particolato allo scopo di associare alle diverse classi dimensionali la rispettiva composizione chimica. A fronte di numerosi studi volti alla caratterizzazione chimica del campione in massa mediante metodologie analitiche diverse [e.g. 1, 2, 3, 4], relativamente pochi studi sono stati finora dedicati ad una caratterizzazione morfochimica delle singole particelle [e.g. 5, 6, 7, 8].

Nel presente lavoro vengono illustrati i risultati preliminari di uno studio morfochimico del particolato fine (PM10) proveniente dai contesti urbani di Perugia e Terni. Lo studio è parte integrante di un progetto di ricerca che vede coinvolti, oltre al Dipartimento di Scienze della Terra, il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Perugia e ARPA Umbria. Tale progetto ha come obiettivo la messa a punto di un procedimento analitico integrato volto alla completa caratterizzazione del particolato atmosferico in diverse realtà umbre mediante tecniche di analisi chimica del campione totale e delle singole particelle, e mediante tecniche di analisi di immagine.

### MATERIALI E METODI

I campioni di particolato atmosferico sono stati forniti da ARPA Umbria e provengono dalle postazioni urbane di monitoraggio ambientale di Perugia (Fontivegge) e di Terni (Via F. Cesi). La postazione di Fontivegge, situata in pieno centro cittadino a poca distanza dalla stazione ferroviaria, si

colloca in un'area caratterizzata da scarsa ventilazione e da intenso traffico veicolare. La postazione di Via F. Cesi è invece collocata sul tetto di uno stabile lambito da intenso traffico veicolare ed è caratterizzata da una ventilazione intermittente a tratti intensa.

In ottemperanza alle vigenti tecniche di misura per la valutazione dei livelli degli inquinanti (Allegato XI del DM 02/04/2002) il sistema di campionamento adottato consiste in una linea di flusso e in un sistema di accumulo su filtro. La linea di flusso è costituita da una pompa a membrana e da un campionatore a basso volume con teste di prelievo a separatore inerziale PM10 (EN LVS TCR Tecora) e PM2.5 (EPA). Il sistema di accumulo è costituito da filtri in teflon di diametro 47 mm. I campioni di particolato vengono raccolti a intervalli di 24 ore. Prima e dopo il campionamento i filtri vengono condizionati per 24 ore a 20°C e al 50% di umidità relativa e pesati mediante bilancia analitica con riproducibilità di 1 µg.

I campioni di particolato atmosferico sono stati osservati in microscopia elettronica a scansione (SEM) e sottoposti ad esame morfometrico completo mediante analisi di immagine (IA) e ad analisi chimica delle singole particelle mediante microanalisi a dispersione di energia (EDS). Per l'osservazione e l'analisi in microscopia elettronica a scansione il particolato è stato estratto da un frammento dei filtri di campionamento in teflon e depositato su filtri in policarbonato (diametro dei pori 0.4 µm). Il procedimento di estrazione è reso necessario dalla impossibilità a trattare le singole particelle direttamente sul filtro in teflon. Ciò a motivo della struttura fibrosa tridimensionale del filtro e dell'eccessivo addensamento del particolato su di esso a seguito dei tempi di raccolta. La scelta del filtro in policarbonato quale supporto per l'osservazione e l'analisi in microscopia elettronica è legata al fatto che, a differenza del

teflon, il policarbonato mostra una superficie liscia e uniforme sulla quale le particelle risaltano in maniera eccellente. Per essere rappresentativo il frammento deve avere area sufficiente a garantire una buona raccolta del campione stesso evitando nel contempo un eccessivo addensamento delle particelle sul nuovo supporto da utilizzare. Il procedimento di estrazione è stato eseguito sul frammento immerso in etanolo sottoponendolo prima ad agitazione per un'ora e poi ad estrazione mediante ultrasuoni per due ore. L'efficacia del trattamento di estrazione è stata verificata sottoponendo il filtro in teflon ad analisi diffrattometrica e poi all'osservazione al SEM per evidenziare l'eventuale presenza di particolato residuo. Dopo la fase di estrazione il particolato è stato recuperato mediante lavaggio in etanolo e filtrazione sulla membrana in policarbonato. Una volta asciutto il nuovo supporto è stato suddiviso in alcuni frammenti a loro volta incollati su portacampioni in alluminio per essere destinati, previa metallizzazione mediante carbone, all'osservazione e all'analisi in microscopia elettronica a scansione (SEM-EDS).

Le osservazioni e le analisi al SEM-EDS sono state eseguite presso il Centro Universitario di Microscopia Elettronica di Perugia utilizzando un microscopio elettronico Philips XL30 (Philips Electron Optics) in linea con sistema EDAX DX-4I di microanalisi e software di acquisizione ed elaborazione dati GENESIS (EDAX). Il procedimento di lavoro è stato articolato in due fasi distinte, la prima di osservazione e raccolta delle immagini, la seconda di microanalisi della composizione delle singole particelle. La tensione di accelerazione applicata è di 15 kV per uno *spot size* pari a 4. I tempi di conteggio per ogni punto analisi variano da 20 a 40 secondi in funzione delle dimensioni dei granuli da analizzare. In entrambi i casi la distanza di lavoro è stata fissata a 10 mm.

Per l'esame morfometrico le immagini raccolte (ingrandimento 5000x, risoluzione 4096x3200 pixel) sono state sottoposte ad un procedimento standardizzato di elaborazione mediante operazioni di filtraggio per migliorare la qualità dell'immagine (*contrast enhancement, remove noise*) seguito dall'applicazione di algoritmi puntuali di soglia (*threshold*) per ottenere la binarizzazione dell'immagine. Tale fase preliminare di elaborazione è stata eseguita mediante il programma Corel Photo-Paint 11. Le immagini binarie così ottenute sono state analizzate mediante il programma di analisi di immagine Image Tool 3.0 (<http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>). Il programma consente di misurare una serie di parametri morfometrici degli oggetti tra cui area, perimetro, lunghezza e angolo di inclinazione degli assi, elongazione, arrotondamento e diametro di Feret. Al termine di questo procedimento tutte le particelle individuate in una immagine risultano identificate da un corredo di dati quantitativi che le descrive dal punto di vista sia morfologico che morfometrico. La precisione analitica stimata è pari al 5%.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

In Figura 1 sono riportate le curve di distribuzione del diametro equivalente dei granuli nell'ambito di campioni di PM10 rappresentativi di diverse situazioni stagionali nei due siti di monitoraggio urbano. Nei grafici il diametro equivalente dei granuli viene efficacemente rappresentato dal diametro di Feret:

$$D_{Feret} = \sqrt{4A/\pi} \quad (1)$$

in cui A è l'area delle particelle. I grafici evidenziano differenze sostanziali tra i campioni provenienti da Perugia e quelli prelevati a Terni. Infatti mentre a Perugia si registra la presenza rimarchevole della frazione medio-fine con massimi di frequenza compresi tra 0.20 e 0.49  $\mu\text{m}$ , viceversa a Terni si rileva la prevalenza della frazione medio-grossolana con massimi di frequenza compresi tra 0.92 e 2.18  $\mu\text{m}$ . Inoltre i valori stagionali dei massimi di frequenza nei due siti urbani mostrano andamenti diametralmente opposti passando dalla stagione estiva a quella invernale facendo registrare un raddoppio dei valori a Perugia e un dimezzamento a Terni.

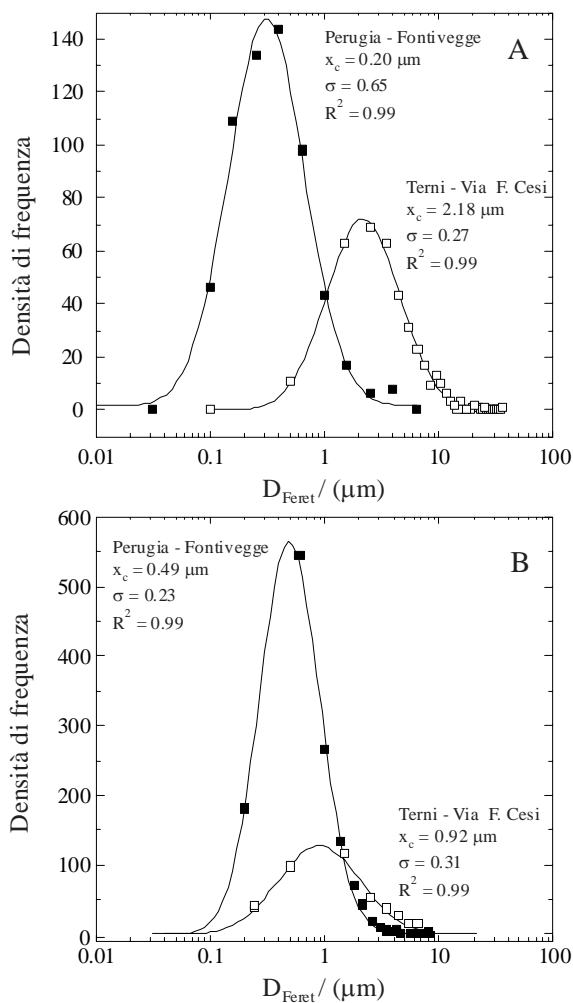


Figura 1: Curve della distribuzione di frequenza del diametro equivalente (diametro di Feret) nei campioni di PM10 di Perugia e Terni prelevati in estate (luglio 2006; A) e in inverno (dicembre 2006; B). Nelle curve  $X_c$  è la posizione del massimo della gaussiana mentre  $w$  è la deviazione standard.

In base ai risultati dell'analisi chimica semiquantitativa al SEM-EDS sono state individuate le seguenti categorie di fasi:

1. silicati: quarzo, feldspati, smectiti (Fig. 2a);
2. fibre ceramiche refrattarie (Fig. 2b);
3. carbonati: calcite, dolomite e witherite;
4. solfati: gesso (Fig. 2c), solfati alcalini (di Na e K) e barite (Fig. 2d);
5. cloruri e fluoruri alcalini;
6. particolato metallico: ossidi di Fe e/o Ti, Cr, Ni (Fig. 2e);
7. particolato carbonioso: particelle costituite quasi esclusivamente da C con tracce di solfati e di metalli (Fig. 2f).

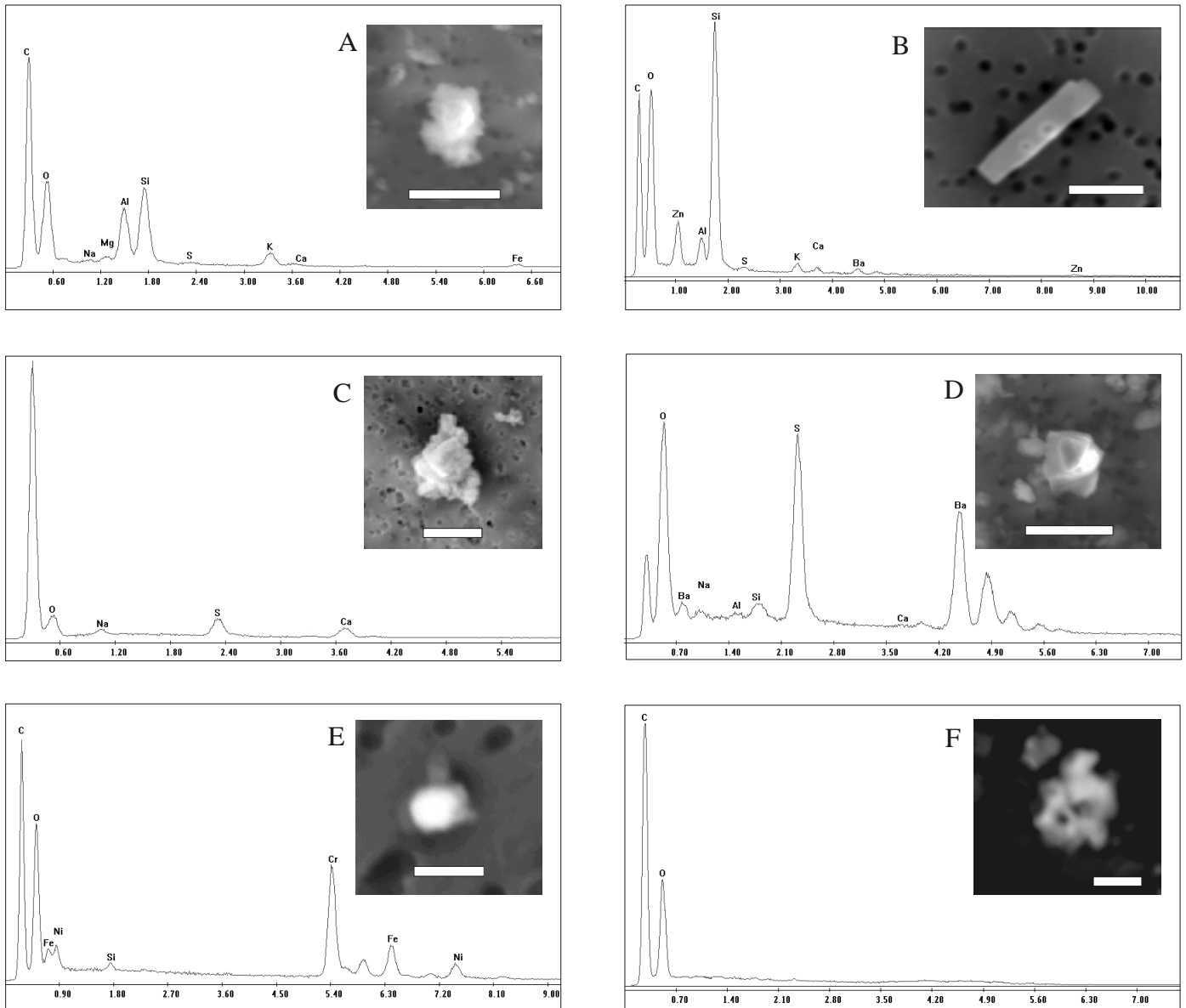


Figura 2: Caratteri morfologici e spettri di composizione di alcune fasi significative nell'ambito del PM10: (A) smectite (la barra misura 5  $\mu\text{m}$ ); (B) fibra ceramica refrattaria (la barra misura 2  $\mu\text{m}$ ); (C) gesso (la barra misura 5  $\mu\text{m}$ ); (D) barite (la barra misura 5  $\mu\text{m}$ ); (E) particella metallica (la barra misura 1  $\mu\text{m}$ ); (F) aggregato di particelle carboniose (la barra misura 10  $\mu\text{m}$ ).

Alcune di queste fasi, quali le fibre ceramiche refrattarie, ladolomite, la witherite e la barite sono state individuate solo a Terni dove, quindi, la composizione del particolato risulta più varia. Inoltre mentre a Perugia le polveri sottili sono costituite in massima parte da solfati (gesso e solfati metallici) e da particolato carbonioso seguiti da quarzo, silicati di varia natura, calcite, cloruri e fluoruri, diversamente a Terni si rileva una presenza preponderante di silicati (quarzo, feldspati e smectiti) e solfati (gesso e, secondariamente, solfati alcalini e/o solfati metallici), tenori variabili (ma in genere superiori che a Perugia) di particolato di natura esclusivamente metallica e una esigua presenza di particelle carboniose. Il diagramma binario di Figura 3 illustra le principali tipologie di fasi presenti a Terni quali evidenziate dall'analisi di un campione rappresentativo di particelle nell'ambito del PM10.

Un elemento che accomuna i campioni di Terni a quelli di Perugia è l'assenza di precise correlazioni tra dimensioni e composizione delle fasi, vale a dire che le fasi individuate non mostrano particolari caratteristiche di affinità nei riguardi di determinate classi morfometriche (Fig. 3).

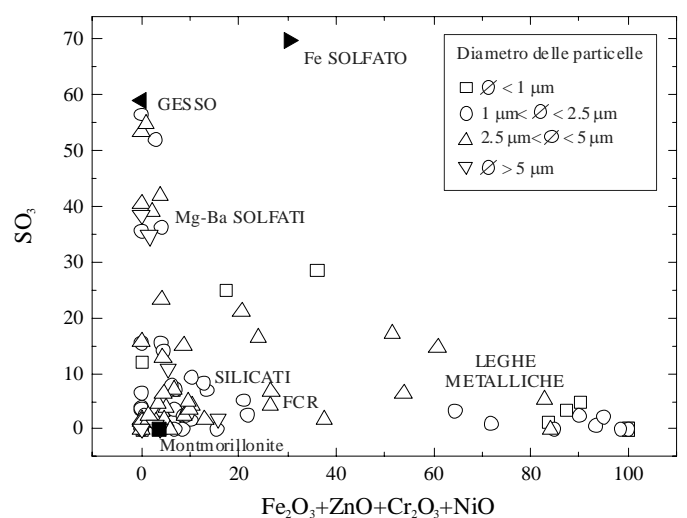


Figura 3: Raggruppamenti di particelle nell'ambito del PM10 a Terni, distinte in base alle dimensioni. FCR = fibre ceramiche refrattarie.

Per quanto riguarda l'origine del particolato, il quarzo, i silicati e la calcite sono di origine naturale cioè derivano dal disfacimento dei suoli, mentre il particolato carbonioso, gli ossidi metallici, i solfati alcalini e i solfati metallici sono di origine antropica e derivano dalle emissioni industriali e/o dalle emissioni dei gas di scarico degli autoveicoli [e.g. 7]. Il gesso deriva dalla interazione tra le particelle di calcite e i composti dello zolfo di origine antropica originatisi a seguito dei processi di combustione.

Il bario è un metallo pesante la cui presenza in atmosfera è dovuta in massima parte a processi industriali legati all'estrazione, al raffinamento e alla produzione di bario e di prodotti chimici a base di bario [e.g. 9]. La presenza nel particolato atmosferico ternano di bario sotto forma di carbonati (witherite) e solfati (barite) testimonia pertanto l'esistenza in zona di attività industriali in cui solfati e carbonati rappresentano i prodotti di recupero e/o di abbattimento delle emissioni industriali.

Le fibre ceramiche refrattarie sono un gruppo di fibre artificiali vetrose prodotte in ambito industriale e utilizzate nel campo dell'isolamento termo-acustico e come materiali di rinforzo nei prodotti plastici e nell'industria tessile [e.g. 10]. Come coibentanti sono principalmente utilizzate nella produzione di componenti di impianti siderurgici e di forni per ceramica. La presenza di fibre di questo genere nell'atmosfera ternana deve essere posta in relazione con l'attività industriale degli impianti siderurgici della zona. Alternativamente essa può dipendere dall'utilizzo di prodotti di rinforzo nell'edilizia civile, nel qual caso testimonierebbe la bassa qualità del prodotto impiegato.

## CONCLUSIONI

Le sostanziali differenze di carattere morfochimico riscontrate tra Perugia e Terni delineano due diversi contesti emissivi nelle due realtà urbane, e precisamente un quadro influenzato in maniera preponderante dal traffico veicolare nel caso di Perugia e un quadro caratterizzato in egual misura dalle sorgenti naturali e dalle emissioni industriali legate all'attività siderurgica nel caso di Terni. Queste osservazioni preliminari, supportate dai risultati delle analisi chimiche sul campione totale e suffragate dall'esame di nuovi campioni da prelevare in prossimità delle principali fonti emissive di origine antropica, permetteranno di individuare le fonti e prevedere la diffusione degli aerosol nel territorio. Inoltre, dalla conoscenza della composizione del particolato atmosferico su scala temporale potrà derivare la possibilità di utilizzare queste misurazioni per valutare l'efficacia di eventuali strategie di abbattimento delle emissioni.

## RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento doveroso spetta a G. Saporita e L. Barcherini per aver collaborato nella fase di allestimento dei campioni e di raccolta dei dati analitici. Si ringrazia inoltre ARPA Umbria per aver finanziato la ricerca.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. A. D'Alessandro, F. Lucarelli, P. A. Mandò, G. Marazzan, S. Nava, P. Prati, G. Valli, R. Vecchi and A. Zucchiatti, Hourly elemental composition and sources identification of fine and coarse PM10 particulate matter in four Italian towns, *Aerosol Science*, vol. 34, pp. 243-259, 2003.
2. R. M. Harrison, A.M., Jones and G.L. Royston, Major component composition of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> from roadside and urban background sites, *Atmospheric Environment*, vol. 38, pp. 4531-4538, 2004.
3. G. M. Marazzan, M. Cerini, G. Valli and R. Vecchi, Composition, components and sources of fine aerosol fractions using multielemental EDXRF analysis, *X-Ray Spectrometry*, vol. 33, pp. 267-272, 2004.
4. L. Paoletti, B. De Berardis and M. Diociaiuti, Physicochemical characterization of the inhalable particulate matter (PM<sub>10</sub>) in an urban area: an analysis of the seasonal trend, *Science of the Total Environment*, vol. 292, pp. 265-275, 2002. *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 4869-4879, 2003.
5. T. L. Conner, G. A. Norris, M.S. Landis and R.W. Williams, Individual particle analysis of indoor, outdoor, and community samples from the 1998 Baltimore particulate matter study, *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 3935-3946, 2001.
6. L. Paoletti, B. De Berardis, L. Arrizza, M. Passacantado, M. Igléssis and M. Mosca, Seasonal effects on the physicochemical characteristics of PM<sub>2.1</sub> in Rome: a study by SEM and XPS.
7. T. Moreno, W. Gibbons, T. Jones and R. Richards, The geology of ambient aerosols: characterising urban and rural/coastal silicate PM<sub>10-2.5</sub> and PM<sub>2.5</sub> using highvolume cascade collection and scanning electron microscopy, *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 4265-4276, 2003.
8. Y. Chen, N. Shah, F.E. Huggins, G.P. Huffman, W.P. Linak and C.A. Miller, Investigation of primary fine particulate matter from coal combustion by computer-controlled scanning electron microscopy, *Fuel Proc. Tech.*, vol. 85, pp. 743-761, 2004.
9. A.A. Francis and C.S. Forsyth, Toxicity summary for barium, U.S. Dept. of Energy, Contr. DE-AC05-84OR21400, Oak Ridge, Tennessee, July 1997.
10. NIOSH, Criteria for a recommended standard occupational exposure to refractory ceramic fibers, Publ. No. 2006-123, Cincinnati, Ohio, May 2006.

## UNA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA NELLA PROVINCIA DI CHIETI

Dario Ambrosini<sup>1</sup>, Lisa Collalto<sup>1</sup>, Stefano Sfarra<sup>1</sup>, Giorgio Galli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DIMEG, Università dell'Aquila, Loc. Montelucio di Roio, I-67040 Roio Poggio (AQ)

<sup>2</sup>Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana 18, I-00100 Roma

### SOMMARIO

Vengono rielaborati i dati rilevati dalla rete di monitoraggio gestita dall'Istituto Mario Negri Sud sulla qualità dell'aria nel territorio della Provincia di Chieti. Si è proceduto nella disaggregazione dei dati partendo dalla visione globale dei fattori inquinanti che insistono sull'intero contesto territoriale, per arrivare ad un sottosettore concernente la valutazione dell'inquinamento atmosferico dovuto alle realtà industriali dei Comuni di Atesa e San Salvo.

Le indagini eseguite nei Comuni menzionati, hanno rilevato che in entrambi i siti il parametro più critico è il biossido di azoto, il cui valor medio, nell'anno 2004, supera il valore limite previsto dal D.M. 60/02.

I dati sono stati elaborati a partire da quelli forniti dal suddetto Istituto, nel seguente modo: i valori medi e massimi sono ottenuti come sommatoria dei rispettivi valori mensili e successivamente divisi per il numero dei mesi dell'anno.

Il fine ultimo di tale studio, oltre il confronto fra i dati elaborati e quelli stabiliti dalla normativa, è evidenziare l'elevata variabilità della qualità dell'aria dovuta alla coesistenza di realtà geografiche ed urbane molto diverse fra loro: si possono osservare zone a notevole concentrazione di attività industriale confinanti con aree completamente verdi.

### INTRODUZIONE

La qualità dell'aria nelle città è tra le maggiori criticità ambientali in Italia [1]. Ciò deriva dal fatto che la percentuale maggiore della popolazione vive nelle aree urbane, in cui si concentrano le emissioni da traffico veicolare, riscaldamento domestico ed attività produttive.

Una determinazione necessaria è quella strumentale mediante analizzatori che registrino il rispetto degli standard legislativi di qualità dell'aria.

In Abruzzo, la qualità dell'aria è esaminata da una rete di monitoraggio alquanto carente, presente solo in due delle quattro Province (Pescara e Chieti). Essa consta di 11 stazioni fisse e di due mezzi mobili di supporto che intervengono nella valutazione di particolari situazioni di inquinamento atmosferico.

Delle undici stazioni fisse, tre sono situate nella Provincia di Chieti (Atessa, San Salvo, Chieti) e sono gestite dall'Istituto Mario Negri Sud, insieme ad una stazione mobile.

Sulla base della decisione 2001/752/CE, le stazioni di monitoraggio sono classificate in base al tipo di zona [2]:

Urbana: zona edificata in continuo;

Periferica: zona largamente edificata, insediamento continuo di edifici separati e mescolati ad aree non urbanizzate;

Rurale: tutte le zone che non soddisfano i criteri relativi alle zone urbane e periferiche;

inoltre, le stazioni sono classificate in base alle fonti emissive principali:

Traffico: stazioni situate in posizione tale che il livello di inquinamento è influenzato prevalentemente da emissioni provenienti da strade limitrofe;

Industria: stazioni situate in posizione tale che il livello di inquinamento è influenzato prevalentemente da singole fonti industriali o zone industriali limitrofe;

Fondo: stazioni che rilevano livelli di inquinamento riferibili al contributo integrato di tutte le sorgenti presenti nell'aria.

E' in fase di sviluppo un piano di ampliamento della rete finalizzato all'ottimizzazione del numero delle stazioni, delle postazioni di misura, della dotazione sperimentale connessa secondo quanto previsto dal D.M. 60/02.

Gli obiettivi di questa attività possono essere riassunti nei seguenti punti essenziali [3]:

- ✓ Verifica del rispetto dei limiti stabiliti dalle normative vigenti;
- ✓ Individuazione dei contributi delle varie sorgenti di inquinamento nelle aree industrializzate.

In questa relazione viene descritto in modo sommario lo stato della qualità dell'aria di Chieti e di alcuni Comuni della

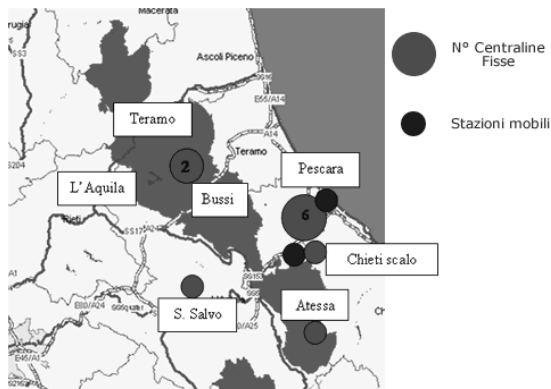


Figura 1: Dislocazione delle stazioni di monitoraggio della Regione Abruzzo (Cortesia A.R.T.A. Abruzzo)

Provincia a partire dai rilievi effettuati mediante la rete regionale nell'anno 2004. Inoltre, vengono riportati i risultati delle indagini effettuate nei Comuni di Atessa e San Salvo, due siti ad elevata densità industriale che hanno consentito di valutare in modo approfondito la qualità dell'aria anche in funzione del fenomeno del trasporto. Uno studio analogo è stato condotto in passato dall'Agenzia Locale per l'Energia e lo Sviluppo Ambientale (A.L.E.S.A.), inerente agli anni 1999-2002, rielaborando parte dell'archivio storico contenente i dati raccolti dall'Istituto Mario Negri Sud [4].

## RISULTATI

I dati sono raccolti dall'Istituto Mario Negri Sud prendendo in considerazione le zone di rilevamento (tre stazioni fisse situate nelle città di Chieti, Atessa e San Salvo e una mobile che "sonda" il comparto industriale provinciale), registrando l'andamento nel tempo delle emissioni e tenendo conto dei valori di velocità e direzione dei venti forniti dalla stazione di monitoraggio atmosferico Teatro D'Annunzio di Chieti.

Tali dati, disponibili giorno per giorno, sono stati successivamente elaborati per tipologia di inquinante, periodo di interesse e localizzazione territoriale come appresso specificato.

### Biossido di azoto (NO<sub>2</sub>)

Nella figura 2 vengono riportate le concentrazioni annue medie e massime di NO<sub>2</sub> rilevate a Chieti e nei Comuni della Provincia nell'anno 2004 e confrontate con la soglia di allarme prevista dal D.M. 60/02.

Gli ossidi di azoto più importanti dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico sono il monossido ed il biossido di azoto [5]. La loro presenza in atmosfera è dovuta essenzialmente ai processi di combustione; la formazione di questi ossidi dipende in particolare dalla temperatura e dal tenore di ossigeno della camera di combustione.

Le principali sorgenti di ossidi di azoto sono costituite dal settore dei trasporti e dagli impianti termici.

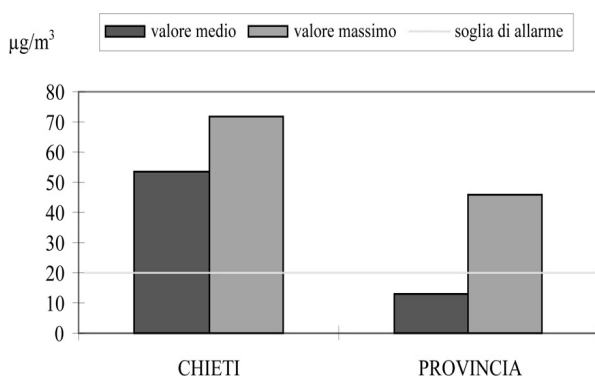


Figura 2: NO<sub>2</sub> – Confronto tra i limiti normativi DM60 e concentrazioni medie e massime annue

Il valore medio annuo di NO<sub>2</sub> misurato a Chieti (53,69 µg/m<sup>3</sup>) è superiore al limite di circa 34 µg/m<sup>3</sup>, mentre quello dei Comuni nella Provincia risulta inferiore, anche se il valore massimo supera di più del doppio la soglia di allarme. Inoltre, per l'NO<sub>2</sub>, sono stati registrati 67 superamenti annui della soglia di allarme nella città di Chieti e 39 nella Provincia.

### Ozono (O<sub>3</sub>)

L'ozono troposferico è un inquinante secondario. Esso è il principale componente del cosiddetto smog fotochimico.

Questo insieme di composti si forma in atmosfera a seguito di complesse reazioni fotochimiche in presenza di radiazioni solari e di inquinanti primari quali gli ossidi di azoto ed i composti organici volatili.

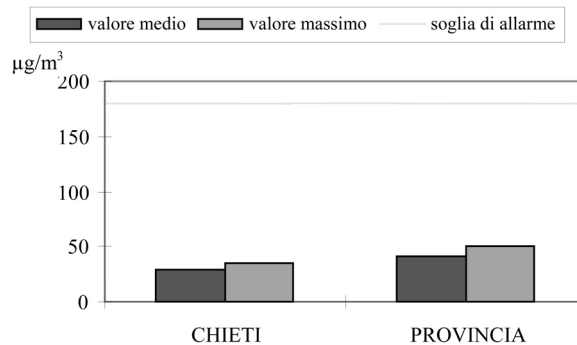


Figura 3: O<sub>3</sub> – Confronto tra i limiti normativi DM60 e concentrazioni medie e massime annue

I valori medi e massimi annui di O<sub>3</sub> sia per Chieti (28,64 µg/m<sup>3</sup> e 34,37 µg/m<sup>3</sup>) che per la Provincia (41,72 µg/m<sup>3</sup> e 49,87 µg/m<sup>3</sup>), risultano inferiori alle soglie di allarme previste dal suddetto Decreto Ministeriale ed inoltre non si sono registrati superamenti della soglia di allarme durante l'anno solare 2004.

### Monossido di carbonio (CO)

E' un gas inodore, incolore, insapore e velenoso. Il monossido di carbonio è un prodotto di combustione incompleta dei combustibili organici, le emissioni maggiori sono prodotte da autoveicoli e da impianti siderurgici, nonché da raffinerie di petrolio ed in quantità minore da centrali termoelettriche.

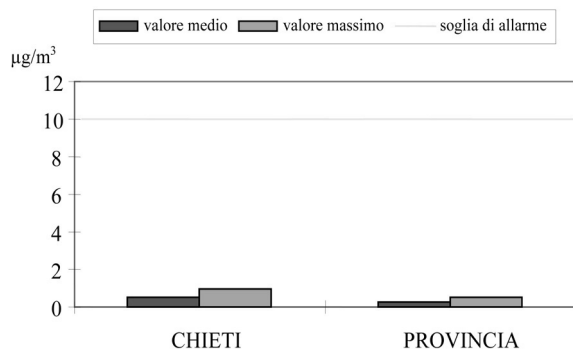


Figura 4: CO – Confronto tra i limiti normativi DM60 e concentrazioni medie e massime annue

L'emissione del CO sia nella città di Chieti che nella sua Provincia, non supera mai la soglia di allarme, anzi, tende a mantenersi piuttosto vicina allo zero. Ciò è giustificato dal fatto che numerose normative limitano l'emissione di tale sostanza in determinati settori, in particolari nei trasporti stradali e nell'industria.

La Dir. 98/77/CE è relativa alle misure da adottare per ridurre le emissioni dei veicoli a motore e la 97/68/CE attiene alle emissioni di inquinanti gassosi e di particolato [6].

Altri riferimenti normativi concernono le emissioni da processi di combustione, tra cui l'incenerimento dei rifiuti e la combustione in impianti industriali.

### Particolato (PM10)

Le polveri di dimensione inferiore a 10 µm hanno origine sia naturale che antropica. Le particelle di origine naturale sono generate dall'erosione dei suoli, dall'aerosol marino, dalla produzione di aerosol biogenico, dalle emissioni vulcaniche e dal trasporto a lunga distanza di sabbia.

Una parte consistente delle polveri ha origine secondaria ed è dovuta alla reazione dei composti gassosi quali ossidi di azoto, ossidi di zolfo, ammoniaca e composti organici.

Inoltre, tra i costituenti delle polveri rientrano composti quali: Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) e metalli pesanti.

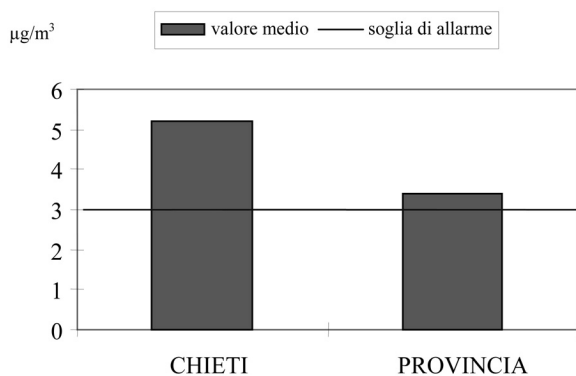


Figura 5: PM10 – Confronto tra i limiti normativi del DM 60 e concentrazioni medie annue

Così come per l'NO<sub>2</sub>, anche per il valore medio del PM10, sia nella città di Chiati, per la quale sono stati rilevati 5,21 µg/m<sup>3</sup>, sia nella Provincia (3,38 µg/m<sup>3</sup>), si osserva un superamento della soglia di allarme, ciò pur non avendo a disposizione i valori massimi per la suddetta sostanza.

Tale fenomeno, a cui contribuisce in larga misura il trasporto su strada ed i processi di combustione industriali, è sicuramente preoccupante per la Regione Abruzzo.

La Dir. LCP 2001/80/CE indica i valori limite di emissione di polveri per combustibili solidi, liquidi e gassosi nei grandi impianti di combustione e la Raccomandazione 2003/47/CE fornisce orientamenti per gli Stati Membri nell'elaborazione del Piano Nazionale di riduzione delle emissioni nei grandi impianti individuati nella Dir. citata.

### SITI INDUSTRIALI

Non essendo la Provincia di Chiati omogeneamente industrializzata, tanto da riconoscere un importante nucleo solo nel basso chietino, si riporta l'andamento annuale della qualità dell'aria afferente alle città di Atesa e San Salvo, localizzate nel suddetto nucleo.

Le campagne di misura nei due siti sono state effettuate mediante due unità fisse e due mobili di supporto dotate di analizzatori per il monitoraggio di tutti gli inquinanti previsti dalla normativa vigente.

La scelta delle postazioni di campionamento è stata fatta

tenendo conto della densità della popolazione e delle condizioni meteorologiche (temperatura, umidità relativa, pioggia e pressione atmosferica) al fine di individuare contributi di emissioni da sorgenti industriali che si possono aggiungere a quelli dovuti al traffico veicolare ed al riscaldamento domestico.

### Atessa

L'area del Comune di Atesa è di notevole interesse, in quanto centro industriale posto sullo spartiacque fra i fiumi Sangro ed Osento, i cui complessi più importanti sono quelli della Sevel che si è dotata di un impianto di cogenerazione e della Honda [7].

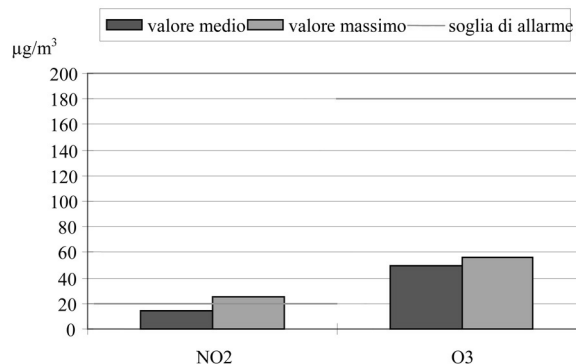


Figura 6: Andamento di NO<sub>2</sub> ed O<sub>3</sub> in Atesa per l'anno 2004

Nella Figura 6 si nota un andamento nella norma per l'O<sub>3</sub> e per il valore medio di NO<sub>2</sub> relativamente all'anno in oggetto, a differenza del valore massimo di NO<sub>2</sub> per il quale si registra un superamento pari a 4,92 µg/m<sup>3</sup> del limite previsto.

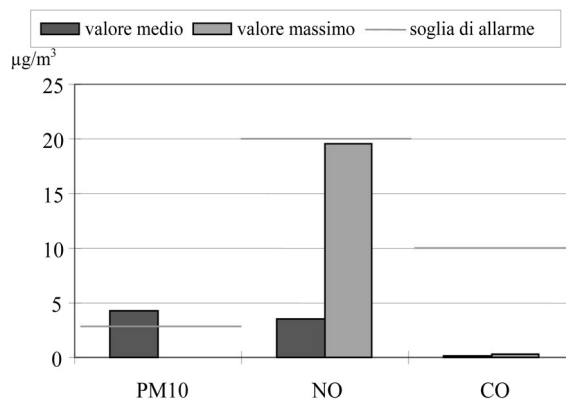


Figura 7: Andamento di PM10, NO e CO in Atesa per l'anno 2004

Nel caso particolare del PM10, l'unico componente che nella Figura 7 supera la soglia di allarme, si registra un valore medio annuo pari a 4,21 µg/m<sup>3</sup>, cui consegue un superamento del limite ministeriale di 1,21 µg/m<sup>3</sup>.

Un'ulteriore anomalia che evidenzia la Figura è il notevole dislivello fra il valore medio ed il valore massimo dell'NO (da 3,59 µg/m<sup>3</sup> a 19,59 µg/m<sup>3</sup>), ciò a causa della presenza di picchi di emissione.

A dimostrazione di quanto appena detto per l'NO, la Figura 8 mostra i suoi andamenti mensili, in ragione del valore medio

e del valore massimo, nell'anno 2004.

Si può notare, focalizzando l'attenzione sul valore massimo nel grafico, che esso supera la soglia di allarme ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) per 4 mesi consecutivi, passando dal valore di  $22,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in Aprile a  $0,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in Maggio (picchi di emissione), a dimostrazione di quanto le condizioni climatiche possano incidere sulle misurazioni effettuate.

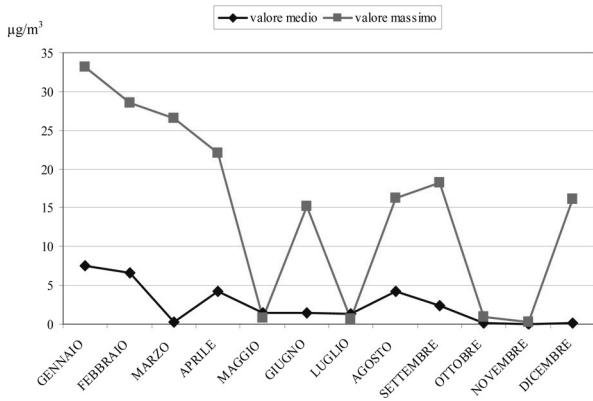


Figura 8: Andamenti mensili di NO in Atesa nell'anno 2004

### San Salvo

San Salvo sorge sui primi rilievi collinari della Provincia di Chieti nei pressi della foce del fiume Trigno [8]. Negli ultimi 20 anni tale città ha subito una profonda trasformazione, passando da un assetto agricolo ad uno prevalentemente industriale, con la nascita dei complessi industriali della Pilkington, che si occupa in particolar modo della produzione di materiali compositi di matrice silicea e della ricerca di materiali innovativi e della Magneti Marelli appartenente al gruppo FIAT.

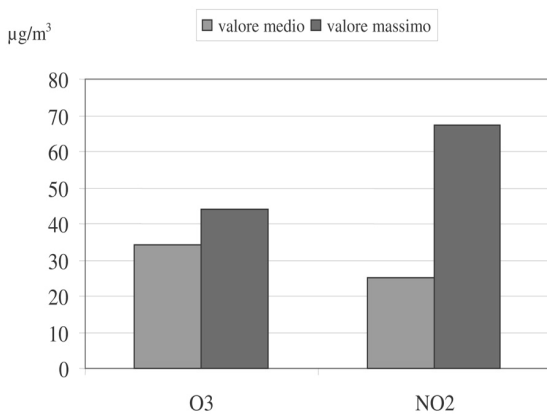


Figura 9: Andamento di NO<sub>2</sub> ed O<sub>3</sub> in San Salvo nell'anno 2004

Nella Figura 9 si notano andamenti discordanti tra O<sub>3</sub> e NO<sub>2</sub>: il primo non supera mai il limite massimo stabilito ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), infatti i suoi valori sono compresi tra un valore medio di  $34,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ed uno massimo di  $43,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mentre il secondo presenta entrambi i valori superiori al limite stabilito dal D.M. 60/02 ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), di  $49,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per il valore medio e  $47,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per il valore massimo.

Nella Figura 10 si nota che i valori sia massimo che medio del CO sono molto al di sotto del limite previsto dalla normativa ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); anzi, essi sono così prossimi allo zero

( $0,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $0,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) da poter essere assimilabili al concetto di "fondo naturale", ovvero lì dove l'aria risulta pulita, il monossido di carbonio è presente in un intervallo di concentrazione che va da  $0,0115 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $0,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Invece, per il monossido di azoto il discorso è differente, a causa della discordanza registrata fra i valori massimo e medio, così come è già avvenuto per la città di Atesa.

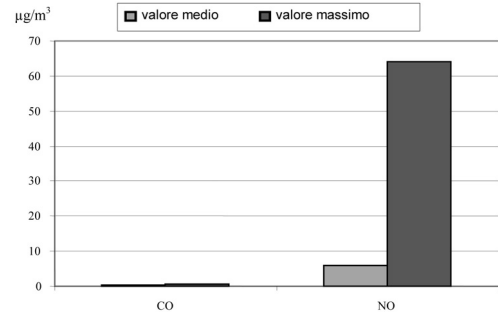


Figura 10: Andamento di NO e CO in San Salvo nell'anno 2004

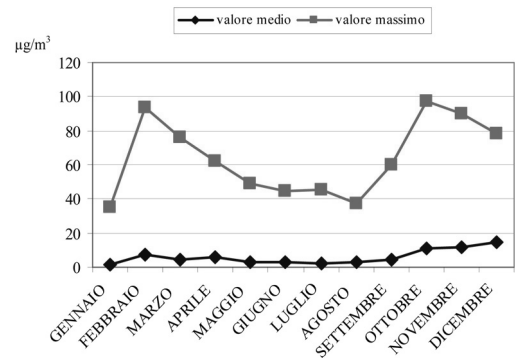


Figura 11: Andamenti mensili di NO in San Salvo nell'anno 2004

Dalla Figura 11 si nota che la concentrazione di NO in inverno è elevata; con scarsa insolazione esso contribuisce a distruggere l'ozono. Quest'ultimo si forma più facilmente nelle ore di massima insolazione, perché aumenta l'apporto della radiazione solare nel processo di formazione (Figura 12).

Normalmente, prima dell'alba si raggiunge il minimo, principalmente per la ripresa delle attività e della corrispondente distribuzione del residuo di O<sub>3</sub> notturno [9].

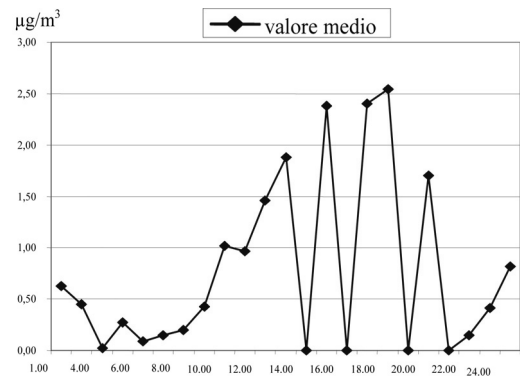


Figura 12: Andamento del valor medio dell'O<sub>3</sub> in San Salvo il 01/07/2004

Oltre agli inquinanti fin qui descritti, nel Comune di San Salvo si hanno informazioni anche su numerosi microinquinanti ad elevata tossicità quali: specie acide, composti clorurati, idrocarburi policiclici aromatici ed altri, per cui è necessaria una valutazione più approfondita della qualità dell'aria per la salvaguardia della salute della popolazione e dell'ambiente in generale.

Nella Figura 13, viene mostrato il profilo inerente l'anno 2004 delle concentrazioni di IPA misurate nella città in esame.

Gli Idrocarburi Policiclici Aromatici sono dei contaminanti organici presenti diffusamente nell'ambiente; essi si formano dalla combustione incompleta di materiali organici, in particolare il legno ed i combustibili fossili, come il carbone ed il petrolio.

Le molecole degli IPA sono costituite da tre o più anelli benzenici. Alcune di queste molecole sono costituite solo da idrogeno e carbonio, altre contengono anche atomi di altra natura come l'azoto e lo zolfo. Appartengono alla famiglia degli IPA alcune centinaia di composti molto eterogenei tra loro.

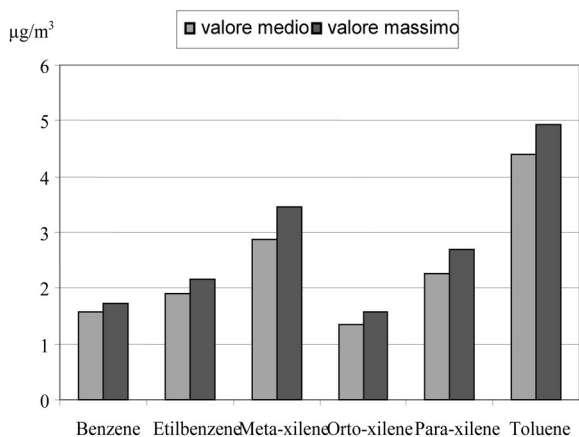


Figura 13: Andamento degli IPA in San Salvo nell'anno 2004

In particolare, abbiamo focalizzato l'attenzione su due giorni dell'anno (15/01/2004 e 01/07/2004) scelti in modo tale da evidenziare l'importanza della climatologia nel monitoraggio di tali sostanze.

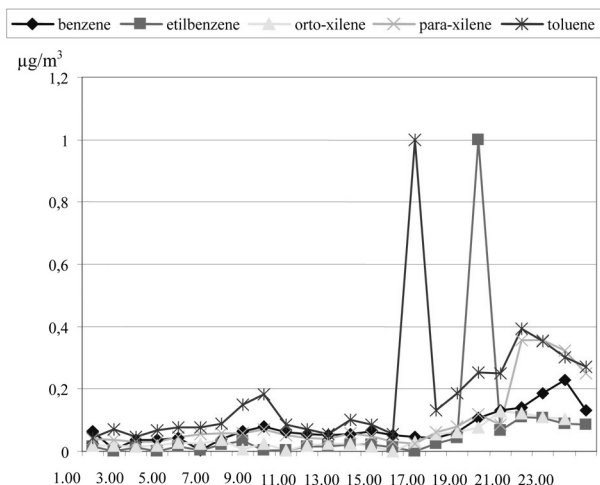


Figura 14: Andamento del valore medio degli IPA in San Salvo il 15/01/2004

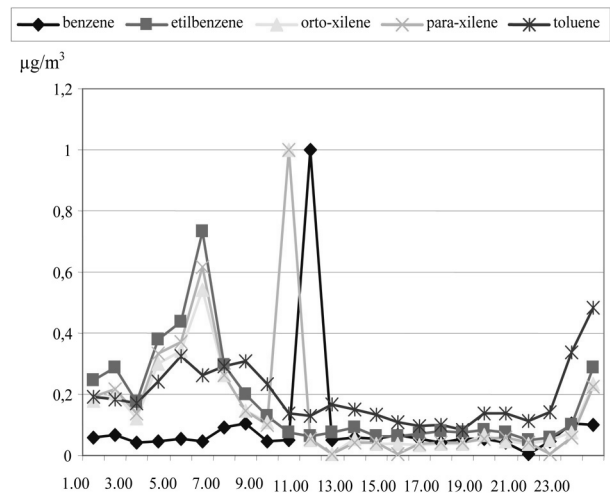


Figura 15: Andamento del valore medio degli IPA in San Salvo il 01/07/2004

Le misure si attestano su valori abbastanza costanti, spesso superiori a  $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valore giornaliero medio annuale, che rappresenta l'obiettivo di qualità per gli IPA secondo il D.M. del 25/11/1994, in riferimento al benzo(a)pirene [10]; infatti si possono notare dei picchi di emissione in determinate fasce orarie: dalle 15:00 alle 20:00 per la Figura 14 e nell'arco della mattinata per la successiva Figura.

Ciò è dovuto principalmente alla presenza di aree urbane dove insistono densità abitative elevate e notevole quantità di traffico veicolare e ad una serie di variabili di tipo meteorologico (variazioni stagionali e giornaliere), socioeconomiche (intensità e fluidità del traffico giornaliero ed orario) e geografico (distribuzione degli assi stradali principali, morfologia del territorio).

La riduzione dei livelli di concentrazione degli IPA presenti in atmosfera nelle nostre città dovrebbe quindi puntare principalmente ad una riduzione delle emissioni legate al traffico veicolare.

Questo obiettivo può essere conseguito tramite interventi tecnologici sugli autoveicoli, oppure tramite l'impiego di carburanti alternativi, più "puliti", incoraggiando la diffusione dei mezzi di trasporto elettrici ed in genere di autoveicoli più piccoli e leggeri, che consumano meno carburante; contemporaneamente va programmata la limitazione del traffico nei centri urbani.

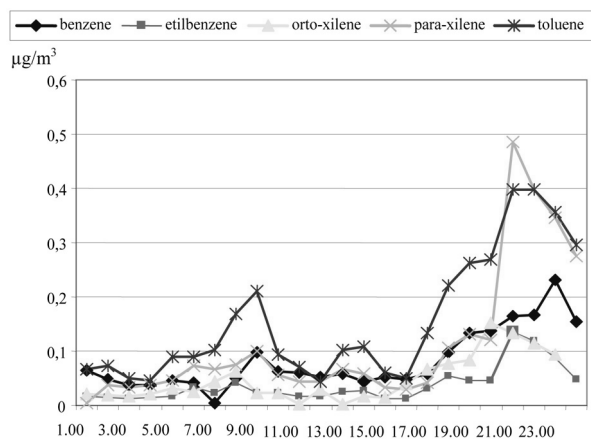


Figura 16: Andamento del valore massimo degli IPA in San Salvo il 15/01/2004

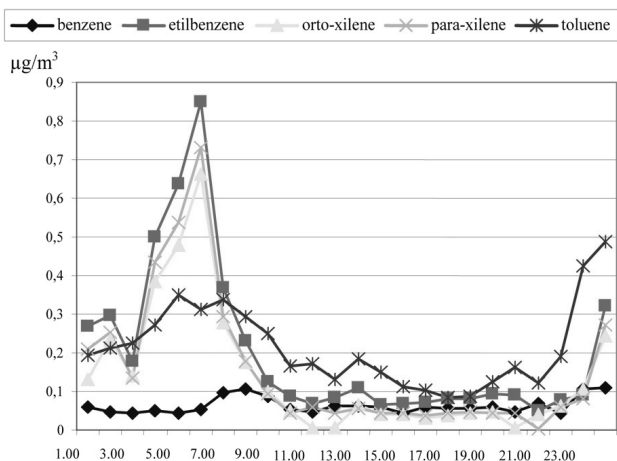


Figura 17: Andamento del valore massimo degli IPA in San Salvo il 01/07/2004

A testimonianza di quanto sopra menzionato, riportiamo anche i valori massimi registrati per tali sostanze nei suddetti giorni: in questo caso si amplificano le irregolarità degli andamenti.

Data l'importanza che queste sostanze hanno assunto negli ultimi anni, si è ritenuto opportuno svolgere tale studio, ma è bene evidenziare che nella Provincia di Chieti, almeno per l'anno 2004, non si sono registrati superamenti del valore limite previsto dal D.M. 60/02.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro vengono elaborati i dati rilevati dalla rete di monitoraggio gestita dall'Istituto Mario Negri Sud sulla qualità dell'aria nel territorio della Provincia di Chieti.

Dalla valutazione effettuata si può concludere che, sia per la città di Chieti che per la sua Provincia, il componente inquinante che presenta maggiore criticità è l'NO<sub>2</sub> per il quale sono stati registrati rispettivamente 67 e 39 superamenti annui della soglia di allarme (20 µg/m<sup>3</sup>), seguito dal PM10, per il quale si osserva in entrambe le zone un superamento della soglia di allarme (3 µg/m<sup>3</sup>), pur non avendo a disposizione i valori massimi.

Lo studio svolto sulla città di Atesa mostra per tutti gli inquinanti dei valori medi al di sotto delle rispettive soglie di allarme e fa registrare lo stesso risultato per i valori massimi a

meno di quelli inerenti l'NO<sub>2</sub> (superamento del limite di 4,92 µg/m<sup>3</sup>) e dell'NO, per il quale si è ritenuto necessario specificare l'andamento mensile.

La città di San Salvo ha mostrato, invece, degli andamenti discordanti tra i vari inquinanti. Si può notare infatti che, al superamento della soglia di allarme da parte dei valori massimo e medio dell'NO<sub>2</sub>, si contrappone un comportamento opposto per i valori dell'O<sub>3</sub>; analogamente a quanto avviene rispettivamente per l'NO ed il CO.

L'analisi effettuata sugli IPA mostra dei picchi piuttosto alti rispetto al limite previsto per la protezione della salute umana (0,1 µg/m<sup>3</sup>), risultando particolarmente elevati in determinate ore del giorno, variabili a seconda della stagione analizzata.

## BIBLIOGRAFIA

1. Disponibile in <http://www.arta.abruzzo.it/aria.php>, accesso 16 Febbraio 2007.
2. Disponibile in [http://www.arpat.toscana.it/aria/ar\\_centraline\\_tipo.html](http://www.arpat.toscana.it/aria/ar_centraline_tipo.html) accesso 16 Febbraio 2007.
3. D. Brocco, P. Barattini, V. Leopardi, M. Maso, A. Rossigni, A. Venditti, P. Prignani, La valutazione della qualità dell'aria nella Provincia di Roma, 5° Congresso Nazionale CIRIAF, Perugia, Italia, 8/9 Aprile 2005.
4. A.L.E.S.A. s.r.l. – Piano Energetico 2004 Documento Preliminare.
5. Baird C. e Cann M., Chimica Ambientale, Zanichelli, Italia, 1997.
6. ARTA Abruzzo – Rapporto sullo stato dell'ambiente in Abruzzo 2005, Capitolo 8 "Aria", disponibile sul sito <http://www.arta.abruzzo.it/aria.php>.
7. Disponibile in <http://www.provincia.chieti.it/frame.php?file=iFrame/m-i/comuni/atesa.php&tp=3>, accesso 16 Febbraio 2007.
8. Disponibile in <http://www.provincia.chieti.it/frame.php?file=iFrame/m-i/comuni/sansalvo.php&tp=3>, accesso 13 Febbraio 2007.
9. Disponibile in [http://www.regione.vda.it/territorio/environment/200635/2006-35\\_7.ASP](http://www.regione.vda.it/territorio/environment/200635/2006-35_7.ASP), accesso 17 Febbraio 2007.
10. Disponibile in [http://www.arpa.veneto.it/glossario\\_amb/htm/ipa.asp](http://www.arpa.veneto.it/glossario_amb/htm/ipa.asp).

## MISURE E STRATEGIE NELL'INQUINAMENTO URBANO DA RISCALDAMENTO

NICOLETTI Giovanni, ALITTO Gabriele, ANILE Francesco.

Università della Calabria - Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Meccanica  
Via Ponte Pietro Bucci - 87030 Arcavacata di Rende (CS)  
Telefono: 0984-494610, Fax: 0984-494673  
e-mail: [g.nicoletti@unical.it](mailto:g.nicoletti@unical.it), [g.alitto@tin.it](mailto:g.alitto@tin.it) e [francesco.anile@unical.it](mailto:francesco.anile@unical.it)

### SOMMARIO

L'inquinamento urbano da riscaldamento è determinato principalmente dalle combustioni di metano, gasolio o assimilati, carbone, che si realizzano negli impianti tecnici di edifici civili ed industriali o di quelli destinati ad attività terziarie.

Esso porta, come acclarato da più tempo, a gravi conseguenze; il che spinge, tra l'altro, le Amministrazioni Locali ed i Governi Nazionali a prendere adeguate misure per limitare e contenere i danni arrecati alle persone, alle cose ed all'ambiente loro circostante

Tra queste strategie, si può immaginare un uso diversificato ed intelligente dei diversi combustibili disponibili, compreso l'idrogeno quale nuova e più pulita fonte energetica.

Nel presente lavoro, dunque, partendo da queste considerazioni, si tenta di confrontare quantitativamente, dal punto di vista tecnico ed ecologico, i diversi combustibili menzionati, mediante alcuni indici adimensionali, varianti tra 0 ed 1, al fine di desumerne l'idoneità ambientale nel riscaldamento urbano.

### 1. INTRODUZIONE

Il problema dell'inquinamento atmosferico ha assunto una notevole importanza da quando ci si è resi conto della gravità dei danni che esso può arrecare alle persone, alle cose e all'ambiente loro circostante.

Nelle aree urbane, dove ha raggiunto, peraltro, limiti di notevole pericolosità, tale inquinamento è provocato essenzialmente dalle emissioni di inquinanti che si producono nei diversi processi di combustione.

A questo proposito, le sorgenti emissive si distinguono semplicemente in fisse (forni e caldaie industriali, inceneritori e vari sistemi di riscaldamento) e mobili (autoveicoli ed altri mezzi di trasporto similari).

In questo lavoro, l'attenzione viene posta sull'inquinamento atmosferico urbano provocato da sorgenti fisse dedicate al riscaldamento domestico ed industriale.

Tale riscaldamento si realizza principalmente attraverso l'impiego di combustibili fossili quali carbone, metano, gasolio o assimilati, che rilasciano, come principali prodotti della combustione, oltre il vapor d'acqua, i seguenti cinque gruppi di inquinanti:

- ossidi di carbonio;
- ossidi di azoto;
- ossidi di zolfo;
- composti organici volatili (COV);
- particolato solido (PS).

A tali emissioni si aggiungono solitamente altri composti (metalli pesanti, diossina, sostanze radioattive, ecc.) che in questa sede non vengono considerati, nonostante un impatto tutt'altro che modesto dal punto di vista sanitario ed ecologico.

La prima parte della presente nota tenta di effettuare un confronto quantitativo sotto l'aspetto tecnico ed ecologico dei diversi combustibili fossili, generalmente utilizzati nel riscaldamento urbano, con l'idrogeno quale fonte energetica del futuro.

È stato preso in considerazione l'idrogeno perché rappresenta, al momento, una soluzione praticabile ai gravi problemi energetici ambientali che incombono da più lustri nelle realtà urbane industrializzate.

In particolare, tale confronto è operato con una puntuale analisi comparata di natura entropica e chimica delle diverse reazioni standard di combustione.

Dal punto di vista chimico, richiamando le proprietà termofisiche dei diversi combustibili considerati, sono stati definiti alcuni indici di bontà ecologica che quantificano l'inquinamento dell'aria in relazione alle concentrazioni dei principali prodotti di combustione.

Dal punto di vista termodinamico, invece, le reazioni di combustione esaminate vengono classificate in base alle loro produzioni entropiche attraverso un indice adimensionale di merito.

Nella seconda parte, il lavoro considera, con discernimento logico-deduttivo, alcune interessanti iniziative che potrebbero essere messe in campo dalle amministrazioni locali per abbattere l'inquinamento atmosferico urbano da combustione e quindi rendere più vivibili le città.

Esse vanno in direzione opposta alle iniziative odierne delle isole pedonali o delle città "a piedi" nelle quali, in molti casi, si attendono fortuite folate di vento che possano spazzare via l'aria inquinata.

Le misure proposte dal lavoro, invece, si basano sull'uso diversificato ed oculato dei combustibili, sull'impiego mirato del riscaldamento elettrico, sul controllo ed adeguamento degli impianti di riscaldamento, sull'uso di nuovi e più puliti

combustibili e su una diversa politica urbanistica della città, che vede la creazione di parchi e di isole verdi capaci di assorbire gli inquinanti presenti nell'aria.

## 2. IL CONFRONTO TECNICO ECOLOGICO NEL RISCALDAMENTO DOMESTICO ED INDUSTRIALE

In questo paragrafo, i diversi combustibili fossili impiegati generalmente nel riscaldamento urbano si confrontano con l'idrogeno attraverso una procedura quantitativa che considera i seguenti aspetti:

- inquinamento chimico da combustione;
- infiammabilità correlata alla pericolosità dei combustibili considerati;
- espansività legata alla potenzialità esplosiva degli stessi combustibili.

Tale procedura di comparazione definisce alcuni indici di bontà tecnica-ecologica che discendono dalle proprietà termofisiche dei combustibili in esame (**Tab. 1**) e dal contenuto di inquinanti prodotti nelle loro combustioni standard (**Tab. 2**).

**Tabella 1:** Proprietà termofisiche dei combustibili

Combustibile	Calore specifico $c_p$ (kcal/kg °C)	Volume specifico $v$ (m <sup>3</sup> /kg)	Potere calorifico $P_{ci}$ (kcal/kg)	Temperatura di combustione $T_c$ (°C)	Temperatura di infiammabilità $T_0$ (°C)
Metano	0,53	$v''' = 1,40$ $v'' = 0,00625$	11900	1750	632
Gasolio o assimilati	2,20	$v''' = 1,20$ $v'' = 0,015$	10200	2200	800
Carbone	0,30	$v''' = 0,8$ $v'' = 0,006$	7600	2000	600
Idrogeno	3,41	$v''' = 11,2$ $v'' = 0,0325$	25000	2400	571

**Tabella 2:** Percentuali ponderali di inquinanti nei fumi di combustione

Combustibile		Contenuto di inquinante nei fumi (kg/kg <sub>combustibile</sub> )					
		SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>x</sub>	PS <sub>x</sub>	COV	H <sub>2</sub> O
Metano	<i>a</i>	0,030	0,0075	2,750	0,00	0,0030	2,154
Gasolio o assimilati	<i>b</i>	0,028	0,0080	2,080	0,30	0,0030	0,850
Carbone	<i>c</i>	0,012	0,0080	1,893	0,75	0,1000	0,633
Idrogeno	<i>d</i>	0,000	0,0160	0,000	0,00	0,0000	7,000
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>

Definiamo dunque:

### indici di inquinamento

$$i_{jk} = 1 - \frac{x_{jk}}{P_{ci} \cdot c_p \cdot T_0}$$

in cui:

- $j$  identifica il  $j$ -esimo combustibile ( $j = a \div d$ );  
 $k$  identifica il  $k$ -esimo inquinante ( $k = 1 \div 6$ );

e dove:

- $x_{jk}$  = concentrazione in massa delle sostanze inquinanti prodotte dalla combustione, espressa in kg<sub>fumi</sub>/kg<sub>combustibile</sub>;  
 $P_{ci}$  = potere calorifico inferiore del  $j$ -esimo combustibile (kcal/kg);  
 $c_p$  = calore specifico a pressione costante espresso in kcal/kg°C;  
 $T_0$  = temperatura di infiammabilità del combustibile, espressa in °C.

Si possono, così, calcolare 24 indici (4×6) di inquinamento, nei quali le concentrazioni ponderali sono rapportate al contenuto energetico di ciascuno dei 4 combustibili. Tali indici sono resi adimensionali mediante l'introduzione del rapporto  $P_{ci}/c_p T_0$ .

Possiamo, perciò, definire, per ogni combustibile un indice globale di inquinamento come:

$$i_{jc} = \prod i_{jk}^*$$

dove:

- $i_{jk}^*$  = indice normalizzato rispetto al massimo.

### indici di infiammabilità

$$i_{jT} = 1 - \frac{T_c - T_0}{T_c}$$

in cui:

- $j$  identifica il  $j$ -esimo combustibile ( $j = a \div d$ );

e dove:

- $T_c$  = temperatura di combustione, espressa in °C.

### indici di espansività

$$i_{jv} = 1 - \frac{v''' - v''}{v''}$$

in cui:

- $j$  identifica il  $j$ -esimo combustibile ( $j = a \div d$ );

e dove:

- $v''$  = volume specifico del combustibile liquido, espresso in m<sup>3</sup>/kg;  
 $v'''$  = volume specifico del combustibile gassoso (o del vapore del combustibile liquido), espresso in m<sup>3</sup>/kg.

Anche per questi ultimi due indici possiamo calcolare il valore normalizzato.

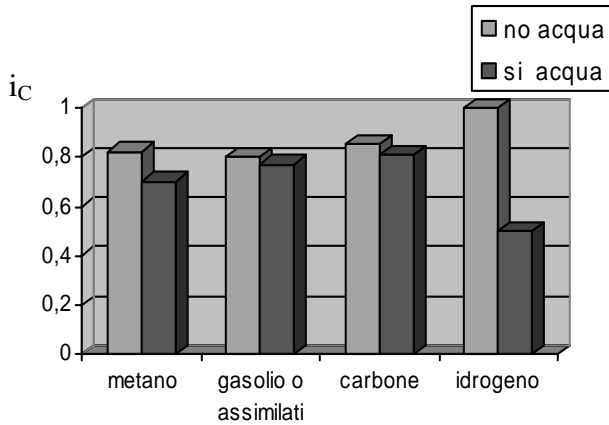
Si osservi che tutti gli indici sopradefiniti assumono sempre

un valore inferiore ad 1 ; a tale valore corrisponde una totale assenza di agenti inquinanti o di infiammabilità o di esplosività del combustibile.

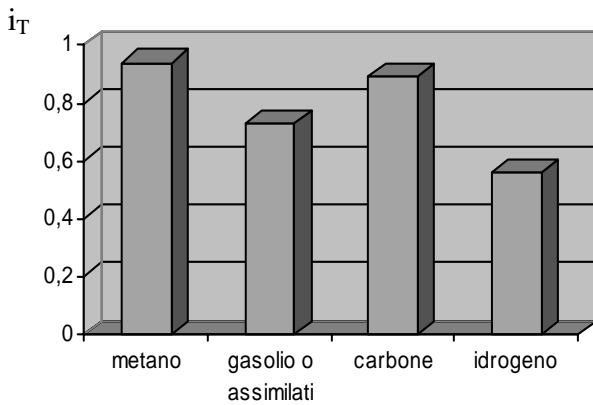
Per tutti gli indici calcolati si è stabilita una graduatoria di qualità, rapportando il valore quantificato per ciascun combustibile al valore massimo. È stato, cioè, determinato l'indice relativo

$$i^* = \frac{i}{i_{\max}}$$

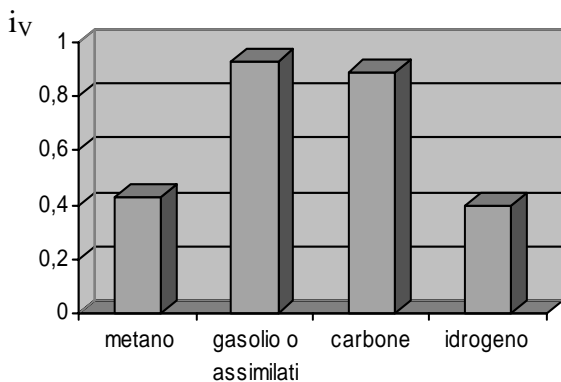
I risultati di questi indici normalizzati sono riportati, in modo esemplificativo, nelle **Figure 1, 2, 3**.



**Figura 1:** Indici di inquinamento



**Figura 2:** Indici di infiammabilità



**Figura 3:** Indici totali di espansività

Gli indici di inquinamento sono stati valutati con e senza acqua.

A vero dire l'acqua non rappresenta un inquinante vero e proprio.

Infatti, essa può essere recuperata con una semplice 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:

$$i_{\text{amb.}} = \left( \prod_{j=1}^n i_{jC}^* i_{jV}^* i_{jT}^* \right)^{1/n}$$

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**.

**Tabella 3:** Impatto ambientale dei diversi combustibili

Combustibile	Impatto ambientale $i_{\text{amb.}}$
Metano	0,90 0,80 (no H <sub>2</sub> O)
Gasolio ed assimilati	0,76 0,72 (no H <sub>2</sub> O)
Carbone	0,82 0,78 (no H <sub>2</sub> O)
Idrogeno	0,95 0,45 (no H <sub>2</sub> O)

### 3. LA PRODUZIONE ENTROPICA NELLE REAZIONI DI COMBUSTIONE

Le reazioni di combustione non sono processi semplici isolati. Pertanto la variazione entropica  $\Delta S$ , connessa a tali processi, risulta composta da una quota parte  $\Delta S^{(i)}$  (sempre positiva) dovuta ad irreversibilità intrinseca, e da una quota parte  $\Delta S^{(e)}$  (positiva o negativa), dovuta a scambi termici attraverso il confine del sistema.

Inoltre, i processi di combustione non danno luogo solo a lavoro di espansione  $\Delta(PV)$ , ma anche lavoro chimico  $\Delta L_{\text{chim}} = (\mu N)$ .

V'è dunque, in ogni processo di combustione, un trasferimento di entropia verso l'ambiente esterno. Nel lungo termine, sommando gli effetti di innumerevoli processi evolutivi, questo trasferimento entropico produrrà uno spostamento dello stato ambientale verso un equilibrio o disordine ecologico, a cui è fatalmente legata una degradazione energetica globale.

Difficile è l'indagare in dettaglio su quali potranno essere gli effetti tangibili di questa degradazione.

Per quanto attiene allo studio teorico di fisica-tecnica è sufficiente affermare che quanto minore sarà la produzione entropica, tanto minore, nello specifico, sarà il danno ambientale connesso.

Al fine di quantificare questo equilibrio, uscendo da vaghe affermazioni qualitative, è stato proposto un indice entropico ambientale, relativo al combustibile  $j$ :

$$i_{js} = \left( 1 - \frac{|\Delta \tilde{s}^* < T >|}{\Delta \tilde{h}} \right)_j$$

in cui:

- j pedice identificativo del tipo di combustibile (j = a ÷ d):  
 a = metano;  
 b = gasolio ed assimilati;  
 c = carbone;  
 d = idrogeno.

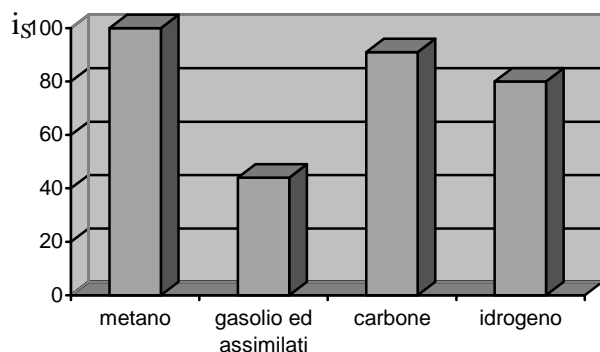
e dove:

- $\Delta \tilde{s}^*$  = generazione entropica globale della combustione, espressa in (J/kmol K);  
 $< T >$  = temperatura assoluta di riferimento =  $0,5(T_{amb.} + T_c)$  espressa in K;  
 $T_{amb.}$  = 298 K;  
 $T_c$  = temperatura di combustione (K);  
 $\Delta \tilde{h}$  = valore specifico dell'entalpia di reazione in (J/kmol); (tale grandezza assume nel prosieguo significato affine a quello di potere calorifico).

Tale indice varia dal valore massimo 1 per il caso di  $\Delta \tilde{s}^* = 0$ , al valore zero per il caso estremo di totale degradazione energetica.

I calcoli della generazione entropica e dell'entalpia di reazione, attraverso il potenziale di Gibbs nelle diverse reazioni di combustione sono contemplati nei riferimenti bibliografici [5], [6] e [7].

Questi calcoli, unitamente alle definizioni di temperatura di riferimento, ci hanno permesso di valutare l'indice sopra definito per ogni combustibile che, normalizzato rispetto ai valori massimi, evidenzia la produzione entropica nei diversi processi di combustione di **Figura 4**.



**Figura 4:** Indici % di impatto entropico ambientale nelle reazioni di combustione

#### 4. ALCUNE PROPOSTE DI MISURE ANTISMOG NELLE CITTÀ

L'inquinamento atmosferico urbano da riscaldamento può essere abbattuto attraverso diverse misure di cui qui appresso elenchiamo.

**4.1.** La *prima* e più ovvia arma che abbiamo a disposizione contro l'inquinamento atmosferico delle città è la graduale

trasformazione dei combustibili impiegati nel riscaldamento domestico ed industriale.

Ciò discende, chiaramente, osservando ad esempio i dati italiani delle immissioni di inquinanti per tipo di combustibile della **Tabella 3**.

La tabella non riporta la produzione di CO<sub>2</sub> in quanto essa concorre indirettamente ad un danno ambientale di portata planetaria e non solo metropolitana (riscaldamento terrestre).

Il consumo di combustibile per il riscaldamento domestico ed industriale è suddiviso tra metano e gasolio od assimilati con netta prevalenza di quest'ultimo.

**Tabella 4:** Stima delle emissioni di inquinanti atmosferici in Italia per il 1980 in relazione al tipo di combustibile

Combustibile	Consumo (%)	SO <sub>x</sub> (%)	N <sub>x</sub> O <sub>y</sub> (%)	Particelle solide ed incombusti (%)	CO (%)
Prodotti petroliferi	58,6	89,5	83,8	86,1	94,5
Carbone (lignite)	10,1	9,1	7,4	2,4	0,3
Gas naturale (metano)	18,3	0,0	6,9	0,3	0,3
Altri combustibili	0,8	2,4	1,9	11,2	4,9
Elettricità primaria	12,2	---	---	---	---

A parte le necessarie indagini di approfondimento sulla questione del mutamento dei combustibili, e soltanto da un punto di vista d'assieme, una **prima considerazione preliminare** che si può fare è la seguente: *se si convertisse il metano disponibile all'impiego prioritario del riscaldamento domestico ed industriale (cosa che sembra fattibile per quanto riguarda l'approvvigionamento) si darebbe un primo duro colpo all'inquinamento cittadino da SO<sub>2</sub>.*

**4.2.** Una *seconda* arma che, se pure non oggi di uso consueto, lo potrà essere in un prossimo futuro, e l'impiego dell'idrogeno come combustibile.

L'idrogeno è il combustibile più pulito, dà come prodotto principale di combustione solo acqua e, nel caso di combustione in aria, produce anche ossido di azoto nonché pochissimi ossidanti fotochimici.

Le ricerche sull'impiego dell'idrogeno come combustibile portano in linea di massima alle sottoriportate conclusioni:

- La tossicità dei prodotti di combustione è ridotta praticamente a zero. La combustione ad idrogeno produce fiamma calda, ferma e pulita; non occorre alcun tiraggio né camino di smaltimento.
- Il trasporto potrà realizzarsi a pressione di 70-100 at, come già in uso per il metano. Ciò consentirebbe, tra l'altro, di sfruttare le stesse tubazioni del metano con un flusso termico di circa tre volte superiore. Questo risulta ipotizzabile in quanto le perdite di carico dei due fluidi, metano ed idrogeno, sono confrontabili.
- La pericolosità di impiego non costituisce un problema, considerata l'esperienza acquisita nell'ingegneria spaziale, nei sommergibili, nelle turbine a gas e negli aerei supersonici.
- L'immagazzinamento dell'idrogeno liquido è stato già

messo a punto con buoni risultati in U.S.A., al centro aerospaziale di Houston.

- e) La produzione dell'idrogeno è sicuramente molto più costosa degli altri combustibili. Una sua economicità di produzione è legata alla possibilità di ottenere idrogeno dalla dissociazione dell'acqua mediante energia solare con celle ad elevato rendimento (idrogeno solare).

Da queste risultanze, sia pure sommarie, ma ormai di dominio pubblico può dedursi una **seconda considerazione preliminare**: *quando un agglomerato residenziale raggiunge condizioni di inquinamento intollerabile, v'è sempre la possibilità teorica di utilizzare reti esistenti per la distribuzione del metano, allo scopo di erogare un combustibile pulitissimo come l'idrogeno. Si tratta di una visione per noi oggi utopistica e prematura, ma non lo sarà più in un futuro non lontano.*

**4.3.** Una **terza** arma è l'impiego dell'energia elettrica per il riscaldamento in tutti quei casi in cui l'emergenza per tossicità atmosferica lo richiama.

Valutiamo, a grandi linee e nel modo più prudentiale possibile, il costo di produzione e distribuzione, ad uso riscaldamento, dell'energia elettrica, prodotta dalla combustione in grandi centrali, attraverso la definizione del sottoindicato rendimento complessivo.

$$\eta_{\text{Tot.}} = \eta_{\text{comb.}}(0,85) \times \eta_{\text{term.}}(0,35) \times \eta_{\text{trasf.}}(0,90) \times \eta_{\text{distrib.}}(0,80) = 0,21$$

Quando, invece, il combustibile viene utilizzato direttamente sul posto, il rendimento della sua trasformazione in energia termica può essere valutato approssimativamente come:

$$\eta_{\text{Tot.}} = \eta_{\text{comb.}}(0,85) \times \eta_{\text{term.}}(0,35) \times \eta_{\text{distrib.}}(0,75) = 0,22$$

Come si vede i due rendimenti sono confrontabili: pertanto l'energia elettrica per uso di riscaldamento risulta vantaggiosa economicamente purché si riducano gli utili delle società produttrici e si migliorino i costi di distribuzione.

Si può così formulare una **terza considerazione preliminare**: *per particolari utenze speciali di pubblica utilità il riscaldamento domestico potrebbe trasformarsi da gestione a gasolio a gestione elettrica.*

**4.4.** Una **quarta** arma importante per il controllo dell'inquinamento atmosferico cittadino rimane la depurazione e la depolverazione preventiva dei fumi da parte dell'utente. È cosa fattibile l'abbattimento di  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$  attraverso l'assorbimento su carboni attivi. Particolare sviluppo hanno avuto le tecnologie di miglioramento di denitrificazione e desolfurazione dei fumi attraverso riduzioni catalitiche selettive.

Nasce da questa misura di prevenzione antismog una **quarta considerazione preliminare**: *le grandi caldaie industriali dovrebbero tassativamente fare ricorso a sistemi di depurazione e depolverazione dei fumi azionati da organi modulari di rilevamento dell'inquinamento.*

**4.5.** Infine, accenniamo brevemente all'importanza dell'organizzazione urbanistica delle città ai fini dell'inquinamento urbano da riscaldamento. In uno studio teorico [3] è stato impostato un calcolo di diffusione di  $\text{SO}_2$

per una città come Milano. In tale lavoro si scopre che un parco centrale non abitato e, naturalmente, non inquinante ha un effetto benefico crescente sino a che il lato del parco raggiunge 0,577 del lato dell'intera città, mentre ha un effetto quasi costante o addirittura decrescente per lati maggiori di quello critico.

In ogni caso, comunque, l'effetto ottimale di un parco centrale in una città porta ad una riduzione modesta della concentrazione di inquinanti circa 0,855. Un effetto assai più benefico sembra, per contro, avere una disposizione radiale a stella di zone inquinanti convergenti in un parco poligonale al centro della città. Ne consegue un'**ultima considerazione preliminare**: *una saggia politica amministrativa di pianificazione urbanistica a lungo termine in una città, funestata da inquinamento, potrebbe essere di grande risultato.*

## 5. CONCLUSIONI

Dalle considerazioni quantitative e qualitative sull'inquinamento urbano da riscaldamento discusse nel lavoro, emergono le seguenti risultanze conclusive:

**1.)** Il confronto ecologico tra i quattro combustibili presi in considerazione è evidenziato dalla **Figura 1**.

Si evidenzia una netta superiorità dell'idrogeno qualora si escluda dal computo l'indice connesso con il vapor d'acqua. Questo, d'altronde, può essere considerato un prodotto non inquinante in quanto riciclabile per condensazione.

**2.)** Sulla pericolosità (inflammabilità) e sulla potenzialità esplosiva (espansività), dei diversi combustibili, la comparazione (**Fig. 2 e 3**) ha evidenziato una migliore posizione dei combustibili convenzionali rispetto all'idrogeno.

Il metano rimane un combustibile poco infiammabile e molto esplosivo.

**3.)** La graduatoria sulla produzione entropica delle diverse combustioni mostra (**Fig. 4**) una migliore posizione del metano rispetto agli altri combustibili. Mentre il carbone e l'idrogeno si collocano rispettivamente al secondo ed al terzo posto.

**4.)** L'impatto ambientale complessivo dei diversi combustibili generalmente impiegati nel riscaldamento domestico ed industriale delle realtà urbane è sintetizzato nella **Tabella 3**. Il primo posto di graduatoria, senza acqua nei prodotti di combustione, è occupato dall'idrogeno. Seguono, poi, nell'ordine, il metano ed a debita distanza il carbone ed il gasolio o assimilati.

L'idrogeno, con il computo dell'acqua nei prodotti di combustione, risulta fortemente penalizzato dai punti di vista ambientale.

**5.)** Per accrescere la qualità della vita e dell'habitat nelle città occorre, a breve termine, realizzare un mutamento nei combustibili usati nel riscaldamento domestico ed industriale nonché, a lungo termine, attivare tutte quelle misure elencate nel paragrafo 4.

**6.)** La comparazione illustrata non considera i costi dei diversi combustibili. Al riguardo, in termini di economia reale, in generale, appare una convenienza dei combustibili fossili rispetto all'idrogeno. Tuttavia, il margine risulta colmabile qualora si riescano a migliorare di qualche punto i rendimenti delle celle combustibili e solari.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. M. Masoere, Emissioni di inquinanti da impianti termici, Convegno AICCAR Impatto degli impianti di riscaldamento e condizionamento sull'ambiente esterno, 1990.
2. R. Arienti, G. Nicoletti, M. Buttiglieri, L'idrogeno come accumulatore di energia solare, 44° Congresso ATI, Arcavacata di Rende CS, 1989.
3. G. Bozza, Inquinamento atmosferico provocato da sorgenti estese, Ricerche di Termotecnica n. 14, 1964.
4. W. Boccola, M. C. Cirillo, C. Trozzi, L'inquinamento atmosferico in Italia, Notiziario ENEA, Energia e Innovazione, 1988.
5. Hutte, Theoretische Grundlagen, 28° ed., Berlino, Verlag von W. Ernst & Sohn, 1988.
6. Landolt, Bornstein, Chemische Handbuch, 6° ed., vol II/4, di W. Auer, 1950-59.
7. G. Nicoletti, Inquinamento atmosferico da combustione: Un approccio termodinamico, La Termotecnica, settembre, 1994.
8. R. Arienti, L. Cassitto, Inquinamento urbano da riscaldamento: alternative pulite agli attuali combustibili e proposte per una efficace prevenzione, Rapporto non pubblicato, 1974.
9. H. Sheer, Die Gespeicherte Sonne – Wasserstoff Als Lösung des Energie und UmWelt Problems, R. Piper GmbH & C. KG, Munchen, 1987.
10. T. N. Veziroglu, Economic Comparison of Solar Hydrogen Energy System with Fossil Fuel System, Solar Wasserstoff Versorgung International Symposium, Zurich, 1989.
11. Z. Massoud, L'Energie et l'Environment, Entropie La Revue Internationale de Science et Techniques Nouvelles en Energetique, Genie Chimique, Genie Biologique, N. 1654/65, 1991.
12. R. Arienti, G. Nicoletti, La definizione di un indice entropico ambientale di alcuni combustibili, Congresso Nazionale ATI, Cagliari, 1990.
13. R. Arienti, G. Nicoletti, M. Buttiglieri, Combustion Quality Indices of Hydrogen and Other Fuels, Ninth International Heat Transfer Conference, Jerusalem, Israel, 22-24 august, 1990.

**SESSIONE**

**INQUINAMENTO DA SISTEMI DI TRASPORTO  
E MOBILITA' SOSTENIBILE**



## INTERAZIONI TRA GLI AGENTI E MODELLI A SCELTA DISCRETA: UNA ANALISI DELLA LETTERATURA CON UNA APPLICAZIONE PRELIMINARE

Guido Paglione<sup>1</sup>, Romeo Danielis<sup>2</sup>, Edoardo Marcucci<sup>3</sup>, Valerio Gatta<sup>4</sup>,

<sup>1</sup> Università di Leeds, Istituto Studi sul Trasporto, 36-40 University Road - LS2 9JT, Leeds UK

<sup>2</sup> Università degli Studi di TRIESTE, Dipartimento di Scienze Economiche e Statistiche, Piazzale Europa, 1 - 31024 TRIESTE –TS

<sup>3</sup> Università degli Studi di Urbino, “Carlo Bo”, Istituto di Scienze economiche, Via Saffi 42 - 61029 URBINO - PU

<sup>4</sup> Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Facoltà di Scienze Statistiche, P.le Aldo Moro 5-00185 Roma - RM

### SOMMARIO

L'inclusione di variabili di interazione all'interno di modelli a scelta discreta è vista come una possibile soluzione al problema di individuare l'appropriata metodologia per stimare l'effetto che l'interazione con altri individui ha sull'utilità di un agente.

L'analisi dell'interazione decisionale tra diversi agenti, e delle variabili relative (ad es. influenza), è di fondamentale importanza nel settore dei trasporti. In particolare, la distribuzione urbana delle merci si caratterizza essere un processo continuo di interazione (con risultati di coordinazione e non coordinazione) fra attori diversi della catena logistica (produttori, trasportatori, operatori commerciali, autorità pubbliche locali). È opinione degli autori che lo studio di tale interazione decisionale possa essere funzionale per valutare le politiche di traffico implementabili in ambito cittadino.

L'obiettivo di questo lavoro è duplice. Da una parte presenta, una rassegna dei precedenti studi che hanno analizzato l'interazione decisionale tra individui adottando modelli a scelta discreta. Particolare attenzione sarà rivolta ad uno specifico modello di interazione, denominato IACE (*Interactive Agent Choice Experiment*). Questo lavoro ne illustrerà le potenzialità così come i limiti. Dall'altra parte, si delineano, attraverso un caso studio, i motivi per cui una tale analisi è di rilevante interesse in riferimento ad una specifica politica di logistica urbana quale è l'installazione di Centri di Distribuzione.

### 1. INTRODUZIONE

È crescente il consenso, sia tra accademici che tra decisori pubblici, sulle opportunità (ad es. economie di agglomerazione) e le criticità (ad es. impatti ambientali, congestione, etc.) del trasporto urbano delle merci (TUM). È altrettanto condivisa l'opinione che tali criticità siano anche la conseguenza dell'interazione decisionale tra i principali agenti della catena di approvvigionamento (produttori, spedizionieri, trasportatori, dettaglianti, operatori di trasporto). Questi, infatti, perseguendo unicamente i propri interessi privati [1], non considerano la possibilità di coordinare le proprie scelte al fine di raggiungere un equilibrio che sia maggiormente efficiente sia da un punto di vista privato (attraverso un'equa distribuzione dei vantaggi e dei costi legati all'attività di distribuzione) che pubblico (riduzione delle esternalità). Riteniamo che l'analisi dell'interazione decisionale tra i vari attori e della loro reciproca influenza sulla decisione finale della catena stessa sul come gestire l'attività di distribuzione, sia di fondamentale importanza per i decisori pubblici. In particolare i decisori pubblici al fine di delineare gli interventi più adatti ad affrontare la questione del trasporto merci, devono tener conto delle interazioni decisionali tra gli agenti della catena di approvvigionamento (o supply chain) e del come queste interazioni influenzino il sostegno degli stessi agenti agli interventi stessi.

Avendo definito il contesto del nostro lavoro, lo scritto ha un duplice obiettivo. Il primo obiettivo consiste nella rassegna dei precedenti studi che hanno analizzato l'interazione decisionale tra individui utilizzando modelli a scelta discreta. Particolare attenzione sarà rivolta ad uno specifico modello di interazione, denominato IACE (*Interactive Agent Choice Experiment*) [5]; [6]; [7]; [8]; [9] e alla sua recente evoluzione [10]. Questo lavoro ne illustrerà le potenzialità così come i

limiti.

Il secondo obiettivo del paper è quello di presentare una prima applicazione di una delle metodologie descritte. Sulla base di questa presentiamo infine le nostre prospettive di ricerca future che riguardano l'interesse nell'applicare tale metodologia ad uno specifico caso concreto di distribuzione urbana tramite un Centro di Distribuzione Urbana (CDU).

### 2. ANALISI DELLA LETTERATURA

L'inclusione di variabili di interazione all'interno di modelli a scelta discreta è vista [11] come una possibile soluzione al problema dell'individuazione di una appropriata metodologia per stimare l'effetto che l'interazione tra individui ha sull'utilità di ogni agente.

In questo senso nella nostra rassegna ci concentreremo solo verso quegli studi che hanno analizzato l'interazione decisionale attraverso l'uso di modelli a scelta discreta, anche se, è il caso dirlo, esistono altri approcci alla modellizzazione dell'interazione sociale che utilizzano strumenti più o meno noti dell'econometria microeconomica [12], [13], [14].

Prima di presentare la rassegna dei metodi tuttavia, vogliamo considerare alcuni degli aspetti rilevanti nell'analisi dell'interazione tra individui, come ottenere le necessarie informazioni a riguardo e motivare il perché dell'uso di modelli a scelta discreta. Presenteremo inoltre, una struttura teorica generale attraverso cui potremo evidenziare le caratteristiche e le singolarità dei vari studi in seguito analizzati.

Gli aspetti da considerare nell'analisi dell'interazione tra individui sono principalmente: l'identificazione dei principali agenti e il tipo di interazione da considerare.

Per quanto riguarda l'identificazione degli agenti, in

generale, possiamo affermare che tale questione é connessa alla definizione stessa di gruppo. Una definizione piuttosto semplice di gruppo, ma allo stesso tempo estremamente flessibile, definisce il gruppo come “due o più agenti interdipendenti che si influenzano l’uno con l’altro attraverso un’interazione sociale” [15]. In effetti, se questa definizione può apparire abbastanza vaga, sottolinea tuttavia uno degli aspetti rilevanti del processo di interazione, in altre parole, la possibilità che alcuni agenti (nel caso sia uno soltanto, questi è comunemente definito leader) possano influire attraverso il loro stato sociale sulle scelte degli altri agenti. In questo senso, si parla specificamente del concetto di “potere”, inteso come l’abilità di ogni membro del gruppo di influenzare le attese, le preferenze e infine il comportamento degli altri componenti del gruppo [16]. Da qui prendiamo spunto per identificare l’altro aspetto del problema, ovvero, quale tipologia di interazione prendere in considerazione. Ad esempio, esistono diverse tipologie di interazione che si basano sull’identificazione degli aspetti psicologici della relazione fra agenti [15]. Nel nostro caso tuttavia, ci riferiremo alla classificazione “economica” fatta da Manski [11] che identifica tre tipologie di interazione: a) interazione nei vincoli (ad es. nelle curve di bilancio); b) interazione nelle aspettative (si pensi ai mercati finanziari); c) interazioni nelle preferenze individuali. Il nostro interesse ricade in particolare, su quest’ultima tipologia (nella triplice forma di effetti endogeni, contestuali e correlati [11]) la cui implicazione sta nella necessità di considerare appunto l’influenza (il “potere”) che ogni agente ha sul processo di scelta, e sulla conseguente massimizzazione dell’utilità, degli altri individui. In questo senso assume un’importanza fondamentale analizzare non soltanto il processo di massimizzazione individuale, ma anche, e soprattutto, quello del gruppo composto dai rispettivi membri e individuare pertanto, la probabilità che il gruppo raggiunga soluzioni di cooperazione o meno.

È questo interesse che, in un certo senso, motiva l’uso dei modelli a scelta discreta. In effetti, si assume che, non solo, come nel caso individuale, molte volte il processo di scelta di ogni individuo si realizza sopra un insieme di scelta limitato e/o discreto<sup>1</sup>, ma anche, e a maggior ragione, che la natura stessa del fenomeno, l’interazione appunto, si caratterizza per essere un processo di scelta “discreto” (es. collaboro - non collaboro, concedo all’altro - non concedo). A questo proposito, e introducendo l’ultima questione sollevata, in altre parole la metodologia più opportuna per reperire le informazioni relative a tale processo di scelta, Manski nota [11] che la stima di tali modelli non può basarsi su semplici dati rilevati (dati RP), perchè di fatto inesistenti, ma nello specifico l’analista necessita di esperimenti strutturati allo scopo di rendere esplicita la percezione dell’influenza che ogni individuo subisce nei processi “interattivi” a cui partecipa. In questo senso, la metodologia delle preferenze dichiarate (dati SP) sembra la più opportuna a reperire le informazioni necessarie riguardo i processi interattivi tra agenti<sup>2</sup>. Viene anche suggerita [20] tuttavia, l’opportunità di stimare tali modelli attraverso la combinazione di entrambe le tipologie di informazione (dati SP e RP insieme).

<sup>1</sup> Per un maggior approfondimento sulla teoria alla base dei modelli a scelta discreta e sulle loro possibili applicazioni si rimanda a Marcucci [17].

<sup>2</sup> È il caso notare tuttavia che anche la metodologia seguita dall’economia sperimentale (che consiste nell’allestimento di veri e propri esperimenti di laboratorio) si presenta come un ulteriore approccio al problema. Per un approfondimento generale sul tema si veda Davis and Holt [18] mentre per un’applicazione concreta al settore trasporti rimandiamo a Holguín-Veras [19].

Come già affermato, prima di passare in rassegna i vari studi analizzati, presentiamo qui un impianto teorico generale, basato su quello suggerito da Adamowicz et al. [21], attraverso cui poter poi evidenziare le caratteristiche specifiche di ogni approccio.

Si consideri che la funzione di scelta di un gruppo di agenti al tempo  $t$  sia una relazione del tipo:

$$c_t : (O, A, Y, D) \rightarrow 2^O \\ (O_t, A_t, Y_t, D_t) \Rightarrow c_t(O_t, A_t, Y_t, D_t) \quad \text{Eq. (1)}$$

che descrive la scelta del gruppo,  $c$ , al tempo  $t$ , come una funzione delle opzioni (alternative) presenti,  $O$  degli attributi caratterizzanti le alternative,  $A$ , di una serie di variabili contestuali,  $Y$ , che possono sia descrivere lo scenario di riferimento in cui l’interazione si realizza, che le caratteristiche dello specifico gruppo, e dei decision makers (agenti) membri del gruppo,  $D$ . L’assunzione di interattività modifica il quadro generale dell’utilità causale (in inglese *RUM-random utility maximization*) introducendo nell’utilità individuale variabili di interazioni per cui l’utilità di ogni individuo (tralasciando per il momento la dinamica temporale e considerando solo due agenti) assume la forma:

$$U_{d_1, S}(c_{d_1}, c_{d_2}, \beta, \tau, \epsilon) \quad \text{Eq. (2)}$$

dove l’utilità del decision maker  $d_1$ , definita sopra un sottoinsieme di scelta  $S$  del più ampio insieme  $O$ , è funzione della scelta da lui compiuta,  $c_{d_1}$ , dalla scelta compiuta dall’altro agente,  $c_{d_2}$ , da un insieme di parametri, rispettivamente di preferenza  $\beta$  e di interazione  $\tau$ , e infine da un termine d’errore  $\epsilon$ , solitamente assunto essere indipendente e identicamente distribuito (IID) tra le varie opzioni di scelta e i vari agenti. In questo senso, l’utilità del gruppo può essere descritta come una funzione delle utilità individuali ovvero:

$$U_S^* = F(U_{d, S}(c_{d_1}, c_{d_2}, \beta, \tau, \epsilon)) \\ U_S^* = \max_S U_S^* \quad \text{Eq. (3)}$$

dove si assume appunto che l’utilità del gruppo,  $U_S^*$ , è una funzione non direttamente specificata (vedremo in seguito le varie ipotesi prese in considerazione) delle utilità individuali e che la scelta del gruppo segue un processo di massimizzazione al pari di quello individuale.

Per concludere, prima di presentare la rassegna dei vari studi, è opportuno far presente che l’impianto generale sopra descritto non sempre riesce a descrivere tutte le specificazioni poi sviluppate dai vari studi. Cercheremo tuttavia, nel prosieguo del paper, di fare riferimento ad esso nel descrivere e sottolineare le caratteristiche dei vari studi.

## 2.1 Rassegna degli studi

In generale possiamo affermare che i diversi studi relativi all’analisi dell’interazione tra individui possono dividersi in due grandi gruppi a seconda del loro obiettivo di ricerca principale: empirico o teorico.

Gli studi di natura empirica si riferiscono principalmente alle analisi delle scelte fatte da membri di una famiglia in diversi situazioni di vita quotidiana come il consumo [22], la scelta delle località estive [20], il grado di partecipazione all’offerta di lavoro e la partecipazione ad attività congiunte [23]; [24].

Un'interessante eccezione al contesto delle scelte familiari è lo studio di Kooreman e Soetevent [25] che prendono in considerazione le interazioni tra allievi della stessa classe in diverse scelte (ad es. fumare, marinare la scuola, possesso di un telefono cellulare).

Alcuni di questi studi ottengono le informazioni necessarie attraverso analisi di scelta congiunta (*conjoint base data* o preferenze dichiarate) [22]; altri invece si basano su dati di preferenza rilevata (dati RP) [23]; [24], [25] e, infine, alcuni fanno uso congiunto di una combinazione di dati SP/RP [20]; [21].

Uno dei principali aspetti analizzati dalla maggior parte degli studi menzionati sopra è stato proprio quello dell'influenza, (o "potere"), che ogni agente esercita nei confronti degli altri riguardo alla scelta finale del gruppo. Data la natura di variabile latente, l'approccio che la letteratura ha suggerito per identificare l'effetto del potere è stato quello di considerarlo come un ulteriore parametro (delineato sopra come  $\tau$ ) associato alla funzione di utilità di ogni membro e che identifica, letteralmente, il peso che l'utilità marginale di ogni singolo attributo per ogni membro ha nella scelta finale del gruppo. In particolare, nell'esempio di due agenti,  $d_1$  e  $d_2$ , e secondo l'approccio generale sopra descritto, l'utilità del gruppo è una media ponderata delle utilità dei suoi membri (di fatto la funzione  $F$  sopra lasciata in forma strutturale si assume essere in questo caso una funzione lineare), come riportato nella seguente equazione:

$$U_s^* = \tau_{d_1,k} (\beta_{d_1,k} A_{ik}) + (1 - \tau_{d_1,k}) (\beta_{d_2,k} X_{jk}) + \varepsilon_{ij} \quad \text{Eq. (4)}$$

dove  $U_s^*$  è l'utilità del gruppo,  $i$  e  $j$  sono due possibili generiche alternative definite sull'insieme  $S$ ,  $A$  sono gli attributi che variano da 1 a  $K$ ,  $\beta$  sono i parametri di preferenza (o utilità marginali) per ogni singolo attributo, ed infine  $\tau$  sono appunto i parametri di influenza che "soppesano" le scelte dei singoli agenti. In questo modo il parametro di influenza così come quelli di preferenza sono stimati attraverso il modello. Si noti che la letteratura assume il "potere" essere un parametro relativo, ovvero, mentre l'influenza dell'agente  $d_1$  è rappresentata dal parametro  $\tau_{d_1,k}$ , l'influenza dell'agente  $d_2$  è rappresentata dal parametro  $(1 - \tau_{d_1,k})$ . Inoltre, come si osserva dalla notazione, si assume che il parametro di influenza varia a seconda dell'attributo considerato [22] (a differenza di altri approcci che descrivono l'influenza a livello di alternativa [20]) con il solo limite però che  $\sum_D \tau_{dk} = 1 \forall k$  ovvero per

ogni attributo  $k$  la somma dei parametri di influenza tra gli individui deve essere pari a 1. Tali assunzioni semplificano l'interpretazione del parametro stesso e della sua conseguente stima empirica. Infatti, un valore del parametro pari a 0,5 rappresenta un eguale potere di influenza di entrambi gli agenti per lo specifico attributo, mentre un valore pari agli estremi (1 o 0) identifica un maggior potere dell'uno rispetto all'altro.

La stima empirica dei parametri di influenza ha il vantaggio di una maggiore affidabilità della stima rispetto ad auto misurazioni (*self-reported*) [16]. In questo senso, lo specifico studio di Dellaert, et al. [26<sup>3</sup>] analizza gli errori di valutazione che i membri della famiglia compiono nel proiettare le reciproche preferenze ed influenze.

Un'interessante caratteristica di tali studi, in particolare di quelli basati sull'analisi congiunta, è la struttura dell'esperimento di scelta che inizia con esercizi di scelta su base individuale che culminano in esercizi di scelta di gruppo. Inoltre, molti di questi studi sono basati sul ranking o rating delle alternative da parte degli agenti piuttosto che sulla scelta diretta di una singola alternativa. In effetti, tale approccio è giudicato migliore rispetto a possibili problemi di aggregazione tra le preferenze individuali [21].

Lo studio di Kooreman è basato su dati RP [24]. Tuttavia tale studio è l'unico ad applicare, direttamente, concetti di teoria dei giochi nella derivazione dell'equilibrio tra le scelte di due singoli agenti. Altrettanto interessante è lo studio di Kooreman e Soetevent [25]. Questo studio si differenzia dagli altri perchè (sulla base di un diverso impianto teorico che descriveremo successivamente) tiene conto dell'influenza non solo di un altro individuo, ma di tutto il gruppo (nel caso specifico una classe di studenti) di cui l'individuo fa parte. Inoltre tale studio considera nel modello direttamente la scelta (e non il rank) compiuta dagli altri membri del gruppo.

Infine, tra gli studi empirici rileviamo quello di Gliebe e Koppelman [23]. Questo studio, di fatto, fa parte di una più vasta letteratura che analizza come i membri di una famiglia distribuiscono il proprio tempo (*time budget*) tra le diverse attività (quale lavoro, studio, divertimento etc.) ed in particolare l'allocazione del tempo tra attività strettamente individuali e attività congiunte (*joint-based activity*). In particolare, è interessante notare che questi autori suggeriscono un nested logit quale modello più adatto ad analizzare il trade-off tra attività congiunte (o anche definibili cooperative) e attività individuali (o non-cooperative).

Concludiamo questo paragrafo con una breve sintesi degli studi teorici. In questo senso il maggior contributo viene da Brock e Durlauf [27], [28], [29], che analizzano l'interazione tra agenti (o come da loro definiti gli effetti sociali) in un quadro concettuale diverso da quello sopra esposto. In particolare, rispetto agli altri studi e secondo quanto suggerisce Manski [11], distinguono le variabili di interazioni in due gruppi: gli effetti contestuali, le  $Y$  di cui sopra, che rappresentano le caratteristiche specifiche del gruppo di appartenenza di ogni agente, e gli effetti endogeni ovvero l'influenza delle scelte degli altri individui. Nel loro caso però, non solo l'influenza deriva dalle scelte che tutti gli altri membri del gruppo hanno sull'utilità individuale (come in Kooreman e Soetevent), ma data l'ipotesi secondo cui difficilmente ogni individuo osserva le scelte di tutti gli altri, tali effetti endogeni sono rappresentati dalla probabilità soggettiva che ogni individuo ha riguardo alle scelte di tutti gli altri. In base poi ad un'assunzione di aspettative razionali, le probabilità soggettive e quelle derivate dal modello (i valori attesi) si equivalgono (*self consistent beliefs*). Interessa notare che gli effetti endogeni in Brock e Durlauf assumono la natura di effetti di "conformazione", in quanto rappresentano la tendenza di ogni individuo a conformarsi o meno alle scelte del gruppo come descritto dalla seguente funzione:

$$EE = \frac{J}{2} (c_{d_1} - E(c_{d_2}))^2 \quad \text{Eq. (5)}$$

dove  $EE$  sta per effetti endogeni,  $E(c_{d_2})$  rappresenta il valore atteso della scelta dell'altro individuo e il parametro  $J$  (che può o meno essere indicizzato per ogni coppia di individui a seconda che si considerino effetti di interazione locale o globale [27]) rappresenta una misura dell'intensità

<sup>3</sup> Questo studio tuttavia non analizza tuttavia l'interazione attraverso modelli a scelta discreta.

dell'interazione, per cui, se maggiore di zero, rappresenta l'incentivo di ogni agente a conformarsi alla scelta del gruppo<sup>4</sup>. Concludendo, Brock e Durlauf, analizzano le condizioni, necessarie e sufficienti, di identificazione dei parametri del modello [28]; [29].

Nel paragrafo successivo presenteremo l'ultimo approccio alla modellizzazione dell'interazione tra agenti a cui dedicheremo una più approfondita analisi.

## 2.2 La metodologia IACE

Sulla base degli studi sopra presentati [22], [26], [20], [25], anche la metodologia IACE (dove la sigla sta per *Interactive Agency Choice Experiment*) si presenta come un approccio all'analisi dell'interazione fra agenti. IACE tuttavia, presenta notevoli differenze rispetto ad essi.

Prima di tutto, IACE si riferisce ad un diverso contesto di analisi, ovvero, laddove gli studi presentati in precedenza si concentrano sull'analisi dell'interazione tra agenti membri di una famiglia, la metodologia IACE, dopo una prima applicazione nel contesto del lavoro a distanza, ("*teleworking*") [5], [7], è fondamentalmente applicata all'analisi dell'interazione tra agenti membri di una supply chain [6], [8], [9], [10].

Rispetto agli altri studi l'obiettivo di IACE non è solo quello di analizzare l'interazione tra agenti, ma anche quello di trovare analiticamente la probabilità che un equilibrio (di accordo /disaccordo) possa avvenire tra le decisioni dei vari agenti.

Nell'introdurre variabili di interazione nella funzione di utilità di ogni individuo, la metodologia IACE [9] si ispira all'approccio di Brock e Durlauf [28], in quanto considera l'interazione come la distanza che separa la decisione di un individuo da quella dell'altro, come descritto dall'Eq. (5). In particolare anche IACE seguendo il suggerimento di Manski differenzia le variabili di interazioni tra contestuali ed endogene. Le prime in questa metodologia, che già affermato si pone come obiettivo l'analisi delle interazioni all'interno delle supply chains, rappresentano il contesto di riferimento in cui queste interagiscono, quale ad esempio il settore industriale di cui fanno parte o l'intero mercato.

Le variabili endogene sono rappresentate invece, come nel caso di Kooreman e Soetevent [25], dalle scelte effettive (realizzate) dell'altro agente.

Gli obiettivi specifici di tale metodologia possono essere sintetizzati come segue: a) analizzare l'influenza di ogni decision maker rispetto la scelta del gruppo, in linea con alcuni degli studi precedenti [22]; b) analizzare l'importanza che la conoscenza o meno della scelta dell'altro ha sull'utilità individuale [5]; c) derivare empiricamente le probabilità di coordinazione tra le scelte individuali; d) analizzare l'effetto che il raggiungimento di un accordo (o di un non-accordo) [7] ha sulla valutazione marginale delle variabili (degli attributi); e) evidenziare quale sono le variabili principali (tra quelle costituenti il contesto di scelta, le caratteristiche individuali e lo sviluppo del processo di scelta) che più impattano sul raggiungimento di un equilibrio [7].

Al fine di raggiungere questi diversi obiettivi, IACE delinea ed implementa una complessa e al tempo stesso interessante struttura di indagini SP, in modo da acquisire le informazioni

rilevanti. In particolare, l'indagine SP è strutturata in una serie di step intermedi denominati "*passes*" e "*rounds*", dove essenzialmente un round rappresenta la somministrazione di questionari SP individuali, mentre un pass è la combinazione di più round dove ad ogni agente è presentata la risposta dell'altro nel round precedente. In questo senso, si può affermare che un pass è l'equivalente di un'indagine SP di gruppo [5], [7].

Questa struttura di indagine SP e il modello in essa contenuto presentano interessanti caratteristiche ma anche svantaggi. La prima caratteristica di IACE rispetto ad altri approcci [22], [20], è l'assenza di un vero e proprio esercizio di scelta di gruppo, (anche se ne viene considerata la possibilità [7]). In questo senso, se da una parte la struttura di IACE può non catturare al meglio le informazioni relative all'influenza tra agenti (ovvero tra agenti che nello stesso tempo scelgono insieme una determinata alternativa), dall'altro può captare altre informazioni rilevanti come, ad esempio, il processo di revisione delle preferenze individuali tra un pass e l'altro.

Da un punto di vista econometrico, invece, IACE permette l'implementazione e la stima di modelli per ogni step del processo. In particolare, la struttura sequenziale di IACE permette [5], [7]: a) la specificazione di funzioni di utilità individuale diverse per ogni agente e step del processo; b) lo sviluppo di modelli diversi a seconda dei diversi gruppi di agente; c) la specificazione di modelli diversi per ogni pass; d) la possibilità di stimare e testare per ogni pass la specificazione del modello (in particolare, testare se la specificazione dei modelli per i pass precedenti stimano i dati relativi ai pass successivi meglio che i modelli specificati per gli stessi pass).

In IACE [6] l'interazione tra agenti viene considerata essenzialmente come un problema di potenziale correlazione tra le osservazioni. Lo specifico modello da adottare, pertanto, deve permettere la maggior flessibilità possibile tra i termini di errore. In questo senso gli autori [6] suggeriscono diversi modelli come il Multivariate Probit, il Covariance Heterogeneity Nested Logit, anche se la maggior attenzione è posta nei riguardi del Mixed Logit<sup>5</sup>. In quest'ultimo caso è possibile adottare diverse specificazioni del termine di errore [2]. Una fra queste è quella che permette contemporaneamente effetti casuali (*random effects*) e correlazione tra le alternative in un dato insieme di scelta. Di fatto, questo significa che il termine di errore è strutturato in due parti, dove una è identicamente e indipendentemente distribuita, mentre l'altra permette di tenere conto della covarianza tra le alternative. Quest'ultima parte del termine d'errore è poi funzione della scelta dell'altro individuo.

Per quanto riguarda i limiti di IACE, il primo viene sottolineato dagli autori stessi del modello [7], [10]. Essenzialmente la progressiva riduzione, lungo i vari pass e round, del campione di analisi ingenera una difficoltà di fornire stime econometriche statisticamente significative per gli step successivi ai primi del processo di interazione. Tale riduzione del campione è connessa al fatto che, nel momento in cui determinate coppie del campione raggiungono un accordo (su una determinata alternativa) prima del termine del processo, tale coppie escono automaticamente dal campione e, quindi, dal numero di osservazioni su cui stimare il modello.

Gli autori sottolineano [10] inoltre, che tale limite è connesso alla rigidità di IACE nel considerare (e quindi

<sup>4</sup> Se gli effetti di conformazione superano gli incentivi privati (ovvero gli incentivi a distaccarsi dalle scelte del gruppo) il modello teorico presenta equilibri multipli. Si veda Brock e Durlauf per un'analisi delle condizioni necessarie all'esistenza di equilibri unici [27], [28], [29].

<sup>5</sup> Per una descrizione di questi modelli si rinvia a Marcucci [17].

stimare) soltanto gli accordi basati sulle scelte effettive (o prime preferenze) compiute dagli agenti, scartando in questo modo possibili osservazioni su accordi derivabili attraverso la combinazione del rank delle preferenze di ogni attore per le diverse alternative.

Riteniamo tuttavia che il maggior limite di IACE sia legato alle sue assunzioni relative al termine di errore. L'introdurre nella funzione di utilità di ogni individuo, la componente deterministica della funzione di utilità associata alla scelta dell'altro agente, sia una nuova versione (anche se molto più sofisticata) del modello Mother Logit [30] la cui caratteristica sta appunto nel far dipendere l'utilità di un'alternativa non solo dai relativi attributi ma anche dagli attributi di un'altra alternativa. Tuttavia tale modello è stato definito [31] inconsistente con il quadro teorico dalla massimizzazione casuale dell'utilità (*RUM-framework*).

È bene sottolineare tuttavia, che tale metodologia è attualmente in corso di sviluppo. In particolare gli autori si sono orientati verso un approccio [10] molto più simile a quelli di precedenti studi come Aribarg e Aurora [22], e come sintetizzato dall'Eq. 4. Gli autori definiscono tale nuova metodologia come MIGI (*Minimum Information Group Inference*) il cui obiettivo è stimare, per ogni specifica dimensione del processo di scelta, il potere di influenza di ogni agente della catena logistica. Una specifica caratteristica di MIGI sta nel derivare le scelte di gruppo basandosi sul rank delle preferenze dei singoli agenti. In questo caso una scelta è definita di gruppo, non solo nel caso in cui ci sia una combinazione tra le prime preferenze di ogni individuo, ma anche quando la prima preferenza di un individuo non viene completamente scartata (non è considerata inaccettabile) nel rank dell'altro individuo. Un'altra caratteristica di MIGI è quella di dividere il processo di stima in due parti, dove la prima analizza la probabilità di scelta del gruppo per tutte le possibili combinazioni tra le alternative (*first pass model*) e la seconda stima, appunto, la probabilità di scelta per quelle combinazioni tra alternative in cui c'è un match nel rank dei singoli individui. In questo caso sono stimati due modelli di concessione (*concession models*) a seconda che l'uno o l'altro agente si conformi alle scelte dell'agente di riferimento (*focal agent*), ovvero il cui rank sia quello che guida le scelte dell'intero gruppo.

### 3. UNA APPLICAZIONE PRELIMINARE

In questo paragrafo presentiamo una simulazione realizzata dagli stessi autori (ovvero con loro protagonisti), basata su un esercizio di scelta di preferenze dichiarate che presentava la scelta tra tre alternative di viaggio in treno per la tratta Trieste-Roma, caratterizzate da determinati livelli di costo e tempo di viaggio e, soprattutto, dalla presenza dell'altro agente. In particolare, agli agenti è stato esplicitamente chiesto di considerare nelle loro scelte anche le preferenze dell'altro agente. Naturalmente tale simulazione non solo è estremamente semplificata, ma soprattutto riguarda un contesto di analisi completamente diverso da quello di interesse sopra riferito, ovvero l'accettabilità di un CDU da parte degli agenti di una supply chain. Tuttavia già questa prima simulazione, per quanto stilizzata, mostra un interessante risultato riguardo l'interazione tra agenti e la loro reciproca influenza sulle decisioni dell'altro.

Secondo la metodologia MIGI, come descritta sopra e come

sintetizzata dall'Eq. 4<sup>6</sup>, si è riscontrato che, date le tre alternative di viaggio così costituite: a) Alt. 1: 45€ e 6h di viaggio; b) Alt. 2: 40€ e 6h e 30min. di viaggio; c) Alt. 3: 55€ e 5h di viaggio; nonostante gli agenti individualmente scelgono l'alternativa 3, (come riportato in tabella 1 tale alternativa ha la maggiore probabilità di scelta per entrambi), la coppia formata dai due agenti sceglie l'alternativa combinata 3/2 (dove con questo si intende che il primo agente sceglie l'alternativa 3 e il secondo l'alternativa 2). Questo perché tale "alternativa" presentava il valore (qui non riportato) più basso della disutilità complessiva (si fa presente che il tempo e il costo sono in realtà due mali e non due beni) del gruppo. L'interpretazione di questo risultato, pertanto, è abbastanza ovvia: in un'analisi di gruppo ciò che conta non è l'utilità dei singoli agenti, ma l'utilità del gruppo stesso. Pertanto la scelta del gruppo si discosta dalla scelta dei singoli agenti (di fatto date le scelte individuali degli agenti ci saremmo aspettati che la scelta del gruppo fosse l'alternativa 3/3) in quanto l'utilità che i due agenti ne derivano è maggiore rispetto a quella derivabile da tutte le altre alternative. In un certo senso questa maggiore utilità può essere interpretata come il guadagno o il benessere aggiuntivo che si ottiene nel viaggiare insieme.

Tabella 1: Scelte della coppia Romeo-Guido

	Romeo	Guido	Coppia R-G
Alternativa 1	2,2%	12,7%	-
Alternativa 2	0,7%	7,8%	-
Alternativa 3	97,1%	79,5%	-
Alternativa 1/1	-	-	0,5%
Alternativa 1/2	-	-	0,6%
Alternativa 1/3	-	-	0,3%
Alternativa 2/1	-	-	0,1%
Alternativa 2/2	-	-	0,2%
Alternativa 2/3	-	-	0,1%
Alternativa 3/1	-	-	34,8%
Alternativa 3/2	-	-	42,8%
Alternativa 3/3	-	-	20,6%

(Fonte: elaborazione degli autori)

### 4. PROSPETTIVE DI RICERCA FUTURE

È nostra intenzione, come già accennato, applicare tale metodologia all'analisi delle interazioni tra agenti della supply chain. Infatti attraverso tale metodologia non solo è possibile individuare le preferenze di ogni attore per le specifiche politiche di trasporto urbano delle merci, ma allo stesso tempo è possibile stimare empiricamente la reciproca influenza nella decisione finale della catena rispetto la gestione dell'attività di distribuzione e pertanto l'accettabilità della catena di approvvigionamento alla politica stessa. Questo metodologia, in particolare, avrà il vantaggio di rilevare la volontà di pagare di ogni agente per l'intervento considerato, distribuendone in maniera efficiente il suo onere finanziario [4], così come il vantaggio di individuare gli incentivi da dare loro per cambiare strategie distributive. Questo è ancor più vero nello specifico caso in cui i decisori pubblici considerino l'opportunità di installare un Centro di Distribuzione Urbana (CDU). Uno dei principali svantaggi che caratterizzano questa politica è, infatti, l'introduzione di un ulteriore stadio nella

<sup>6</sup> Per ragioni di spazio non si riportano qui le stime dettagliate del modello ma soltanto le simulazioni in termini di probabilità di scelta delle varie combinazioni di alternative. Coloro che fossero interessati ad un maggior dettaglio possono chiedere direttamente agli autori.

catena di approvvigionamento. Tale stadio ulteriore crea dei costi aggiuntivi [2] che causano la mancanza di interesse degli attori verso tale politica, soprattutto perchè non sempre essi sono compensati da corrispondenti benefici logistici. Al contrario, è solo attraverso l'allocazione efficiente tra gli agenti coinvolti dei costi aggiuntivi generati unita ad una personalizzazione del servizio (come l'offerta di servizi IT) a determinare la fattibilità del centro e la sua accettabilità [3].

## 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. D. Egger, M. Ruesch, Consolidated Best-Practice Handbook-D2.4, Year 2003, *Final report*, pp. 1-387, [www.bestufs.net](http://www.bestufs.net), 2004.
2. M. Browne, M. Sweet, A. Woodburn, J. Allen, Urban Freight Consolidation Centres/*Final Report*, Transport Studies Group, University of Westminster, pp. 1-190, 2005.
3. M. Beuthe, E. Kreuzberger, Consolidation and Transshipment, Chapter 15 in A.M. Brewer, K. Button, D.A. Hensher, (eds), *Handbook of Logistics and Supply Chain Management*, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, 2001.
4. City Ports project (2005), Interim report, [http://www.regione.emiliaromagna.it/wcm/ERMES/Canali/trasporti/logistica\\_merci/distribuzione\\_merci\\_citta/pubbl\\_3/City\\_Ports\\_vol7\\_ingl.pdf](http://www.regione.emiliaromagna.it/wcm/ERMES/Canali/trasporti/logistica_merci/distribuzione_merci_citta/pubbl_3/City_Ports_vol7_ingl.pdf)
5. A.M. Brewer, D.A. Hensher, Distributed work and travel behaviour: The dynamics of interactive agency choices between employers and employees, *Transportation*, vol. 27, pp. 117-148, 2000.
6. D.A. Hensher, Models of organizational and agency choices for passenger and freight related travel choices: notions of inter activity and influence, 8th IATBR Conference, *Discussion paper*, 8th IATBR Conference Workshop, pp. 1-21, 2002.
7. D.A. Hensher, J. Rose, Modelling agent interdependency in group decision making, *Transportation Research Part E*, vol. 40, pp. 63-79, 2004.
8. D.A. Hensher, Puckett, S., Freight distribution in urban areas: the role of supply chain alliances in addressing the challenge of traffic congestion for city logistic, *Working paper, 04-15*, Institute for Transport Studies Sydney, pp. 1-24, 2004.
9. D.A. Hensher, S. Puckett, Theoretical and conceptual framework for studying agent interaction and choice revelation, *UGM 04 working paper*, Institute of Transport and Logistics studies, pp.1-29, Sydney, 2005.
10. S.M. Puckett, D.A. Hensher, Modelling interdependent behaviour as a sequentially-administered stated choice experiment: analysis of freight distributions chains, paper presented at the 2006 Conference of the International Association of travel Behaviour Research, , pp. 1-36, Kyoto, Japan, 2006.
11. C. Manski, Economic analysis of social interactions, *The Journal of Economic Perspectives* vol.14 (3), pp. 115-136, 2000.
12. A. Kapteyn, S. Van de Geer, H. Van de Stadt, T. Wansbeek, Interdependent preferences an econometric analysis, *Journal of applied econometrics*, vol. 12, pp. 665-686, 1997.
13. M. Browning, P.A. Chiappori, Efficient intra-household allocations: a general characterization and empirical tests, *Econometrica*, vol. 66, pp. 1241-1278, 1998.
14. T. Aronsson, S. Blomquist, H. Sacklen, Identifying interdependent behaviour in an empirical model of labour supply, *Journal of applied Econometrics*, vol. 14, pp. 607-626, 1999.
15. R.S. Baron, N.L. Kerr, Group process, Group Decision, Group Action, Open University Press, Buckingham, pp. 271, 2003.
16. K.P. Corfman, Perceptions of relative influence: formation and measurement, *Journal of Marketing Research*, vol. 28, pp. 125-135, 1991.
17. E. Marcucci, (a cura di), *Introduzione ai modelli a scelta discreta per lo studio dei trasporti*, cap. 1 e cap. 3, Carocci Editore, Roma, 2005.
18. D.D. Davis, C.A. Holt, *Experimental Economics*, chapter 1, Princeton University Press, New Jersey, 1993.
19. J. Holguin-Veras, E. Thorson, K. Ozbay, Preliminary results of experimental economics application to urban goods modelling research, *Transportation Research Record-Journal of the Transportation Research Board*, n.1873, pp. 9-16, 2004.
20. D. Dosman, W. Adamowicz, Combining Stated and Revealed Preference data to Construct an Empirical Examination of Intrahousehold Bargaining, Staff paper, Rural Economy, Department of Rural Economy, University of Alberta, 2002, pp. 1-30.
21. W. Adamowicz, M. Hanemann, J. Swait, R. Johnson, D. Layton, M. Regenwetter, T. Reimer, R. Sorkin, Decision strategy and structure in households: a "group" perspective, *Marketing Letters*, vol.16, pp. 387-399, 2005.
22. A. Aribarg, N. Arora, H. Bodur, Understanding the role of preference revision and concession in group decisions, *Journal of marketing research* vol. 39(3), pp. 336-349, 2002.
23. J.P. Gliebe, F.S. Koppelman, A model of joint activity participation between household members, *Transportation* vol. 29, pp. 49-72, 2002.
24. P. Kooreman, , Estimation of econometric model of some discrete games, *Journal of Applied Econometrics*, vol. 9, pp. 255-268, 1994.
25. P. Kooreman, A. Soetevent, A Discrete Choice Model with social interactions; an analysis of high school teen behaviour, working paper, University of Groningen, pp.1-28, 2002.
26. B.G.C. Delbert, M. Prodigalidad, J. Louviere, Family members' projections of each other's preference and influence: a two-stage conjoint approach, *Marketing Letters* vol. 9(2): 135-145, 1998.
27. W.A. Brock, S.N. Durlauf, (2001a), Discrete choice with social interactions, *Review of Economic Studies*, 68, pp. 235-260, 2001.
28. W.A. Brock, S.N. Durlauf, Multinomial choice with social interactions, Working paper, pp. 1-44, Departments of economics, University of Wisconsin, 2003.
29. W.A. Brock, S.N. Durlauf, Identification of binary choice models with social interactions, Working paper, pp. 1-38, Departments of economics, University of Wisconsin, 2004.
30. D. McFadden, W. Tye, K. Train, An Application of diagnostic tests for the Independence from Irrelevant Alternatives Property of the Multinomial Logit Model, *Transportation Research Record*, 637, pp. 39-46, 1977.
31. D. McFadden, K. Train, , Mixed MNL models for discrete response, *Journal of Applied Econometrics*, vol.15, pp. 447-467, 2000

## CENTRI URBANI DI DISTRIBUZIONE DELLE MERCI E POLITICHE DEL TRAFFICO: UNA VALUTAZIONE EMPIRICA TRAMITE LE PREFERENZE DICHIARATE

Edoardo Marcucci<sup>1</sup>, Romeo Danielis<sup>2</sup>, Guido Paglione<sup>3</sup>, Valerio Gatta<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Università degli Studi di Urbino, “Carlo Bo”, Istituto di Scienze economiche, Via Saffi 42, 61029 URBINO –PU

<sup>2</sup> Università degli Studi di TRIESTE, Dipartimento di Scienze Economiche e Statistiche, Piazzale Europa, 1 - 31024 TRIESTE –TS

<sup>3</sup> Università di Leeds, Istituto Studi sul Trasporto, 36-40 University Road - LS2 9JT, Leeds – UK

<sup>4</sup> Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Facoltà di Scienze Statistiche, P.le Aldo Moro 5 – 00185 Roma – RM

### SOMMARIO

I centri di distribuzione urbana (CDU) delle merci rappresentano una tra le soluzioni più frequentemente suggerite, sia a livello internazionale sia, recentemente, nazionale, per razionalizzare la distribuzione delle merci in ambito urbano, in modo da ridurre gli impatti ambientali e di congestione del traffico. Nonostante ciò, i CDU si sono raramente dimostrati realmente efficaci ed economicamente sostenibili, a causa soprattutto degli scarsi volumi movimentati e, quindi, di un loro mancato utilizzo da parte degli operatori interessati.

Questo lavoro presenta uno dei primi tentativi di quantificare, attraverso la metodologia delle preferenze dichiarate, la disponibilità a pagare degli operatori privati per l'utilizzo del CDU, rispetto all'effettuazione del trasporto delle merci con mezzi propri. Attraverso l'uso di modelli a scelta discreta (logit multinomiale) e basandosi sul *data set* ottenuto con le preferenze dichiarate, si stima il grado di importanza relativa che hanno le principali caratteristiche del CDU e le possibili misure di regolazione del traffico nel determinare la scelta degli operatori. Si è proceduto inoltre, alla simulazione degli effetti, in termini di probabilità di scelta del CDU, di possibili politiche di intervento del settore per testarne preliminarmente l'efficacia e fornire, quindi, delle indicazioni utili allo studio della sostenibilità finanziaria ed economica del CDU. Il caso di studio si riferisce alla città di Fano nelle Marche e il campione comprende sei filiere merceologiche per un totale complessivo di 86 imprese intervistate.

### 1. INTRODUZIONE

Nelle aree urbane un'importante quota di traffico veicolare, stimata tra l'11% e il 24% [1], è legata alla distribuzione urbana delle merci. Se da un lato il trasporto urbano delle merci<sup>1</sup> e' di fondamentale importanza per il sostentamento e lo sviluppo delle città (ad esempio favoriscono le ben note economie di urbanizzazione [2]) dall'altro aggrava le già critiche condizioni, ambientali e di traffico (congestione), in cui si trovano la gran parte delle città italiane ed europee. In effetti, il largo uso di veicoli vecchi, oltre che di grossa dimensione (oltre le 3,5 t.<sup>2</sup>), e il basso fattore di carico dei veicoli che porta ad una maggiore frequenza delle consegne<sup>3</sup> (in particolare di colli di piccola-media dimensione) aumenta sia il livello di inquinamento sia la congestione all'interno delle città. Tuttavia, bisogna considerare che il trasporto urbano delle merci (TUM) è caratterizzato da notevoli criticità legate sia alle caratteristiche tipiche delle città (limitata capacità della rete stradale soprattutto nei centri storici), sia all'assenza di un'adeguata offerta di servizi dedicati (ad es. parcheggi riservati, aree carico/scarico adeguate, ecc.). Tali

condizioni riducono l'efficienza del TUM e ne amplificano gli impatti sulle condizioni di traffico (si pensi ai parcheggi in doppia fila) e ambientali delle città. Per completare il quadro relativo delle criticità bisogna sottolineare la scarsa informazione e consapevolezza degli impatti negativi del TUM, soprattutto da parte degli operatori direttamente interessati (produttori, trasportatori, operatori commerciali) che, di fatto, perseguendo unicamente i propri interessi privati [3], non considerano l'opportunità di coordinare le loro decisioni per ridurre tali impatti negativi e migliorare l'efficienza della distribuzione.

E' per fronteggiare queste criticità che sono stati lanciati, soprattutto a livello europeo, diversi progetti di ricerca e di sperimentazione effettiva, allo scopo di individuare le migliori soluzioni al problema tramite diverse politiche di intervento. Tra i vari progetti realizzati si ricordano (senza pretesa di essere esaustivi e considerando solo i più recenti): SURFF, IDIOMA, BESTUFS I/II, City Ports, City Freight [4]; [5]; [3]; [6]; [1]; [7]. Il risultato comune di tutti questi progetti é l'individuazione di un complesso di politiche ed interventi necessari a far fronte alle criticità del TUM. Tali politiche ed interventi possono essere sintetizzate secondo la seguente classificazione:

- Politiche fiscali (o anche di carattere economico o *market-based*<sup>4</sup>);
- Politiche regolative (anche dette *command and control*);
- Politiche di pianificazione;
- Interventi infrastrutturali;

<sup>1</sup> Trasporto urbano delle merci, distribuzione urbana delle merci e city logistics sono termini intercambiabili. Nel prosieguo dell'articolo gli autori utilizzeranno l'abbreviazione TUM in luogo del termine trasporto urbano delle merci.

<sup>2</sup> Questi veicoli sono ormai banditi dall'entrare nel centro cittadino in quasi tutte le città europee ed italiane.

<sup>3</sup> In effetti, questo processo è legato ai recenti mutamenti della domanda dei consumatori ed in particolare alla maggior sensibilità dei consumatori al fattore tempo che ha spinto le *supply chains* (le catene dell'offerta) a adottare strategie di riduzione dei tempi sia dei processi produttivi (*just-in-time*) che distributivi (*lead-time*).

<sup>4</sup> La definizione *market-based* sta ad indicare che queste politiche non sono il frutto di un processo di mercato, ma che impattano unicamente e direttamente sui prezzi/costi della distribuzione urbana

- Innovazione tecnologica;
- Politiche sociali e di *management*<sup>5</sup>.

Alcuni degli specifici obiettivi che è possibile perseguire, tramite le diverse politiche sopra citate e che, di conseguenza, ne motivano l'uso, concernono la riduzione della lunghezza (in termini di km percorsi) e del numero di consegne, il trasferimento della domanda dagli orari di "picco" a quelli di "non-picco", la promozione della terziarizzazione dei servizi di trasporto, la riduzione delle esternalità negative attraverso strumenti di tariffazione, lo sviluppo e utilizzo di veicoli a basso impatto ambientale e di carburanti alternativi, l'adozione di tecnologie IT (tra cui software per la gestione degli ordini e del giro delle consegne), l'incentivazione dell'intermodalità nel TUM, la promozione della collaborazione fra agenti economici.

In sintesi, le diverse politiche hanno il comune obiettivo di ridurre i costi esterni del trasporto merci.

Nel far fronte alle criticità del TUM, infine, è importante sottolineare la necessità per le autorità locali (governi ed enti regolatori) di perseguire un approccio integrato [1], che da un lato guardi alle specificità del contesto cittadino e, dall'altro, promuova un'omogeneità delle soluzioni all'interno della città e tra città (in accordo con le politiche nazionali), integri le varie misure implementabili (costituendo dei veri e propri "pacchetti di misure") e soprattutto coinvolga gli stessi attori locali nella designazione ed implementazione delle misure.

Di fatto una delle principali cause di insuccesso delle varie politiche è stata ed è l'assenza di supporto degli attori direttamente interessati all'implementazione della politica stessa dovuta, sia, come già accennato, ad un loro noncoinvolgimento nella fase di designazione, sia, prim'ancora, all'incapacità (e a volte non volontà) da parte delle autorità locali ad analizzare e scontare *ex-ante* l'accettabilità futura degli attori alla specifica politica da realizzare. E questo è tanto più vero con riferimento all'implementazione di una specifica politica infrastrutturale quale è l'installazione di Centri Urbani di Distribuzione (CDU).

Il presente lavoro, pertanto, attraverso la metodologia delle preferenze dichiarate e l'utilizzo di modelli a scelta discreta, presenta uno dei primi tentativi di quantificare l'accettabilità o, con un termine tecnico, la disponibilità a pagare degli operatori privati per l'utilizzo del CDU. Il lavoro è strutturato come segue. Il paragrafo successivo presenta le caratteristiche specifiche dei CDU, il loro interesse in ambito nazionale e internazionale, nonché i precedenti approcci seguiti nella valutazione dell'opportunità di una loro installazione. Nel terzo paragrafo viene illustrata l'intervista e gli esercizi di scelta ipotetica sottoposti alle imprese commerciali e di trasporto. Le dimensioni e le caratteristiche del campione intervistato sono espresse nel 4 paragrafo. Il paragrafo 5 presenta le simulazioni dell'impatto delle politiche di regolazione del traffico per filiera<sup>6</sup>. L'ultimo paragrafo discute i risultati ottenuti, trae alcune prime conclusioni e propone futuri approfondimenti.

## 2. I CENTRI URBANI DI DISTRIBUZIONE (CDU)

In letteratura non esiste un'unica definizione di CDU, ma, al contrario, con la stessa definizione di CDU vari autori fanno riferimento indifferentemente a: depositi pubblici per la distribuzione delle merci, centri urbani di *transshipment*, centri di consolidamento urbano (CCU), piattaforme merci, sistemi co-operativi per le consegne, centri di consolidamento, ecc [8]. Ai fini del presente lavoro per CDU s'intende una *facility* logistica relativamente vicina all'area che deve servire (centro cittadino, città, distretto, ecc.) nella quale si consolidano i carichi per la consegna finale, anche se si può immaginare la fornitura di diversi servizi a valore aggiunto all'interno dei CDU a cominciare, come si suppone nel nostro caso, da servizi di magazzinaggio.

L'installazione di Centri di Distribuzione Urbana è stata una delle politiche più in voga negli anni '70/'80 sia a livello europeo sia, successivamente, a livello nazionale. In seguito, si è perso interesse per tale politica ritenendola incapace di raggiungere effettivamente l'obiettivo di riduzione del traffico merci all'interno delle città. Tuttavia, negli ultimi anni (in particolare dal 2000) sta riguadagnando credibilità tra i policy maker europei e nazionali [3]. A supporto di questo nuovo interesse sta il fatto che molti dei CDU, attualmente operativi, tra cui si cita, ad esempio, quelli di La Rochelle, Malaga, Evora, Bristol, Heathrow e, a livello nazionale, quelli di Ferrara e Padova<sup>7</sup>, sono stati installati dopo il 2000 [8].

La ragione di questo altalenarsi di interesse e credibilità riguardo l'installazione di un CDU è da ricercare nel trade-off esistente tra i benefici con esso raggiungibili e i costi connessi alla sua installazione e funzionamento nonché, e soprattutto, all'accettabilità di questi stessi costi da parte degli attori direttamente coinvolti. Le maggiori criticità connesse all'installazione di CDU, in altre parole quelle che più delle altre influenzano l'accettabilità di tale politica tra gli operatori coinvolti, sono le seguenti: 1) i costi connessi alla rottura di carico<sup>8</sup>, al costo di *transshipment*, e al costo per singola operazione imposto dal CDU e la possibilità che questi costi superino i benefici (privati e sociali) ottenibili<sup>9</sup>; 2) la perdita di controllo da parte degli operatori (in particolare dei produttori) della distribuzione della merce, 3) la perdita di un'interfaccia diretta con il cliente. Bisogna rilevare inoltre, che stante l'assenza di un coordinamento tra gli agenti (o, come prima menzionato, la diversità di interessi perseguiti) ciascun operatore cerca di evitare di sostenere i costi derivanti dall'utilizzo del CDU e tenta di traslarli su gli altri anelli della catena.

In questo senso, è ovvio dedurre che la principale condizione di praticabilità (accettabilità) di un CDU sta nell'efficiente allocazione, tra tutti gli attori coinvolti, degli extra-costi derivanti dalla sua realizzazione, unita ad una personalizzazione del servizio a seconda delle caratteristiche e delle necessità funzionali ed operative delle diverse categorie merceologiche e dei vari operatori logistici effettivamente presenti nello specifico ambito urbano. Tale efficiente

<sup>5</sup> Anche se a volte in letteratura si usa il termine politiche di *management* per indicare le politiche di gestione del traffico, nel nostro caso utilizziamo questo termine per indicare quegli interventi ad opera degli stessi operatori privati (quali ad esempio la promozione di corsi di guida per autisti o la riduzione degli orari di lavoro).

<sup>6</sup> Per ragioni di spazio non sono presentate in questo contributo le stime econometriche ottenute dal modello.

<sup>7</sup> Altri CDU attualmente operativi ma precedenti al 2000) sono quelli di: Aachen, Kassel, Monaco, Groningen, Amsterdam, Tenjin, Genova, e Vicenza.

<sup>8</sup> Ricordiamo che il CDU s'inserisce, di fatto, come un link ulteriore nella catena logistica (o distributiva) urbana [9].

<sup>9</sup> Marcucci, et al. [10], presentano un'analisi schematica della praticabilità dei CDU basata sui costi e sui benefici connessi con la loro implementazione.

allocazione è possibile solo se essa è commisurata all'effettivo beneficio (marginale) che il CDU ha per ogni singolo operatore e, pertanto, alla disponibilità a pagare per esso. La metodologia presentata in questo lavoro rende possibile l'identificazione dell'accettabilità (la "*willingness to pay*") di ogni singolo operatore all'installazione di un CDU, in riferimento non solo alle sue caratteristiche, ma anche al contesto regolativo in cui si inserisce. Tuttavia, prima di presentare le caratteristiche specifiche della nostra metodologia presentiamo una breve rassegna di precedenti approcci alla valutazione degli effetti di un CDU in modo da rilevarne i loro limiti e le differenze col nostro approccio.

## 2.1 Approcci alla Valutazione degli Effetti di un CDU

I primi approcci apparsi in letteratura [11], [12], relativi alla valutazione dei CDU non offrono in realtà una metodologia concreta alla valutazione degli effetti di un CDU, ma si fermano a riscontrare unicamente la necessità di installare infrastrutture logistiche condivise al fine di rendere possibile il consolidamento ed il de-consolidamento delle spedizioni da parte delle imprese di trasporto.

Anche l'approccio seguito dall'Unione Europea, che consiste nella semplice diffusione dei casi di successo ("*best practices*" [3]) realizzati nei paesi membri, pur essendo utile sotto un profilo di diffusione della conoscenza delle concrete possibilità e dei benefici connessi nell'installazione un CDU, ha l'evidente svantaggio di non essere generalizzabile, ovvero ogni città ha caratteristiche sue proprie che possono non adattarsi alla strategia, pur di successo, realizzata in un'altra città.

Uno degli approcci più formali è quello, di tipo tecnico-ingegneristico<sup>10</sup>, che si basa sulla misurazione degli impatti ambientali e di traffico (congestione) prima e dopo l'installazione del CDU [14]; [15]. In particolare ricordiamo l'analisi compiuta da Nemoto [16] che, attraverso la costruzione di due indici (uno quale misura di efficienza e l'altro di equità), descrive i benefici (netti) sociali e privati conseguiti da tutti gli operatori coinvolti nell'attività del CDU. Tale approccio, pur essendo empiricamente valido, ha due svantaggi. Il primo si riferisce alla sua natura di analisi *ex-post*, ovvero valuta i benefici del CDU solo dopo che questo è stato installato, ma non dice nulla circa la fattibilità, e, in particolare, l'accettabilità *ex-ante* di tale politica. Il secondo svantaggio (connesso con il primo) è che tale metodologia non tiene conto degli impatti e delle ripercussioni organizzative, economiche, strategiche, relazionali, in breve comportamentali, che la politica del CDU ha sugli attori della catena.

In questo senso, un'interessante analisi empirica delle condizioni *ex-ante* di un CDU è stata quella condotta dal progetto City Ports per la città di Bologna [17], il quale, analizzando l'origine e la destinazione dei flussi, l'efficienza logistica delle esistenti filiere e le loro caratteristiche strutturali, giunge alla conclusione che il CDU può attrarre merce solo da determinate filiere logistiche (fra cui quella del Collettame, della Messaggeria, dei prodotti Tradizionali Secchi, delle Consegne a domicilio e della parte

dell'Ho.Re.Ca. che non coinvolge prodotti freschi ed infine della merce confezionata ed immediatamente etichettabile). Concludiamo questa breve rassegna descrivendo l'approccio, di Regan e Golob [19], simile a quello suggerito in questo paper, che ha tentato di analizzare le condizioni di accettabilità *ex-ante* all'installazione di un CDU<sup>11</sup>, basato sulla rivelazione della disponibilità a farne uso (o *willingness to pay*)<sup>12</sup> da parte degli operatori di trasporto. Anche in questo caso ci sono però due limiti da rilevare. Il primo consiste nell'analizzare le preferenze di un solo anello della catena (pur essendo il maggiormente coinvolto). Il secondo sta nell'assenza di una contestualizzazione del processo di scelta richiesto agli operatori. Infatti, ad essi non è stato chiesto né di confrontare "l'alternativa CDU" con quella attualmente disponibile, né di tenere in considerazione la situazione regolativa (attuale e/o futura) caratterizzante il proprio scenario di riferimento (o contesto cittadino).

Il nostro approccio, che descriveremo nei seguenti paragrafi, è stato quello, invece, di valutare il CDU relativamente al contesto in cui si inserisce, rendendo esplicite le condizioni e le politiche del traffico urbano. Questo perché riteniamo che l'uso del CDU dipenda non solo dalle sue caratteristiche (in termini di costi e di qualità del servizio), ma anche dalle alternative disponibili. Quest'ultime sono determinate sia dall'efficienza organizzativa del servizio di trasporto (che può essere in conto proprio od in conto terzi), che dalla regolamentazione del traffico in vigore (limiti all'accessibilità, al parcheggio ed eventuali costi di ingresso).

## 3. GLI ESERCIZI DI SCELTA IPOTETICA E IL MODELLO UTILIZZATO

L'indagine effettuata prevedeva la realizzazione di un'intervista faccia a faccia con un campione di operatori commerciali ed operatori di trasporto della città di Fano mirante a raccogliere sia dati di carattere generale sull'attività svolta e sui volumi di traffico generati e gestiti e sia, principalmente, le informazioni relative alla scelta tra scenari ipotetici alternativi.

Nel nostro caso, come già menzionato, abbiamo previsto due scenari alternativi: il primo riguardava l'ipotetico utilizzo del CDU (alternativa CDU) ed il secondo l'utilizzo di mezzi di trasporto privati (alternativa MP), sia in conto proprio che in conto terzi. Le caratteristiche (o in gergo gli attributi) ed i relativi livelli per descrivere entrambe le alternative sono riportati nelle tabelle 1 e 2. Nella scelta degli attributi e dei livelli rilevanti per entrambe le alternative, si è cercato, da un lato, di offrire una descrizione realistica delle due realtà (considerandone le potenzialità e le criticità connesse e gli strumenti regolativi in mano ai policy makers), dall'altro (con riferimento all'alternativa CDU) si è considerata l'esigenza "statistica" di avere sufficienti livelli di variazione. Si è seguita dunque più un'impostazione teorica che empirica, data soprattutto la mancanza di esperienze concrete. Ad ogni

<sup>11</sup> Interessante, in questo senso, è anche lo studio condotto nell'area metropolitana milanese [18] che rileva come, di fatto, il CDU (o piattaforma logistica di quartiere) risulti poco accettabile da parte degli operatori locali.

<sup>12</sup> In particolare, è chiesto agli operatori di riportare la loro valutazione delle diverse caratteristiche del CDU per poi procedere ad una loro clusterizzazione in funzione delle diverse valutazioni relative.

<sup>10</sup> Bisogna notare tuttavia che tale tipo di analisi non è predominio unicamente degli "ingegneri", ma, al contrario, ha anche applicazioni di natura prettamente economica (come, ad esempio, analisi Costi-Benefici [13]).

intervistato sono stati sottoposti 16 esercizi di scelta (confronti fra strutturazioni diverse delle due alternative) in modo da ottenere un buon numero di informazioni sulle preferenze di ciascun intervistato oltre che raccogliere un numero complessivo di dati sufficiente per una stima robusta dei modelli di scelta [20].

Tabella 1 – Attributi e livelli per la descrizione del servizio di consegna tramite CDU.

Attributi	Livelli
Costo del servizio di consegna per pacchetto	0,5 euro, 1 euro, 2 euro, 3 euro
Tempo di consegna della merce a destinazione dall'ora in cui è consegnata al CDU	In giornata, il giorno dopo, dopo due giorni
Tracking and tracing	Si, no
Disponibilità di magazzino	Si, no

Tabella 2 - Attributi e livelli per la descrizione del servizio di consegna tramite mezzi propri

Attributi	Livelli
Velocità media nel tragitto urbano	5 km/h, 10 km/h, 20 km/h
Numero di ore in cui è possibile effettuare la consegna	24, 8, 6, 4
Distanza degli stalli per la consegna	2 m, 20 m, 100 m circa
Costo del permesso per veicolo all'anno	0 euro, 50 euro, 100 euro, 150 euro,
Regole di accesso al centro	Veicoli 3,5 t, Euro 2, tutti

In particolare, lo specifico modello qui adottato, denominato modello logit multinomiale (si rimanda a Marcucci, et al. 2006 per una descrizione più approfondita del modello) permette di calcolare empiricamente quale sia la probabilità (*ex-post*) che un determinato agente scelga una specifica alternativa (CDU o MP), correlando tale probabilità all'utilità che l'agente riceve da essa rispetto all'utilità complessiva ottenibile da tutte le altre alternative possibili (compresa essa stessa)<sup>13</sup>.

Oltre al calcolo delle probabilità di scelta (calcolo che si effettua in un secondo momento), tali modelli permettono di stimare l'importanza marginale (sintetizzata in un coefficiente) che ciascuna caratteristica o attributo del servizio (in questo caso CDU e MP) ha per l'agente nel proprio processo di scelta e la significatività statistica (rappresentata dai t di Student) che tale attributo ricopre.

Sulla base dei risultati ottenuti (ovvero attraverso i coefficienti stimati) è possibile effettuare delle simulazioni per scenari<sup>14</sup>. Più specificamente è possibile stimare come cambia la probabilità che il CDU (o il MP) venga scelto se vengono alterate le variabili (in particolare i livelli) rappresentanti le

politiche di regolazione del traffico. Nei successivi paragrafi del paper saranno presentati unicamente questi ultimi risultati.

#### 4. IL CAMPIONE

Il numero di interviste complessive è stato pari a 92, ed in particolare 86 riguardavano imprese appartenenti a specifiche filiere merceologiche (come indicate nella tabella 3), mentre le ultime 6 riguardavano operatori di trasporto (che per semplicità indicheremo come "filiera 6"). La classificazione del campione per filiere ha preso spunto dai risultati di analisi precedenti sulla logistica urbana [21], [9], tenendo conto sia del bene commercializzato sia della dimensione dell'impresa in termini di superficie. Data la dimensione del campione e le finalità di segmentazione statistica abbiamo ritenuto di adottare una classificazione piuttosto aggregata.

Tabella 3 – Composizione del campione

Filiere merceologiche	Numero
Beni alimentari freschi e non, prevalentemente su piccole superfici	15
Bar, ristoranti e pizzerie	9
Capi d'abbigliamento, prevalentemente su piccole superfici	18
Beni non di abbigliamento, prevalentemente su piccole superfici	40
Merceologie specializzate su medie superfici	4
<b>Totale Parziale</b>	<b>86</b>
Operatori di trasporto	6
<b>Totale complessivo</b>	<b>92</b>

Da alcune analisi socio-economiche (relative comunque alle sole prime 5 filiere) riguardanti: il numero dei dipendenti, i metri quadri di superficie dell'attività commerciale, il fatturato, e la presenza/assenza di un magazzino proprio, è risultato che [10]:

- la filiera maggiormente rappresentativa è costituita da quella delle piccole superfici commerciali dedicate a beni non di abbigliamento (librerie, ottica, calzature, fiorerie, etc.);
- la gran parte delle imprese intervistate è di piccole-medie dimensioni sia in termini di numero di occupati che di fatturato;
- salvo qualche eccezione (filiera dell'alimentare e del non abbigliamento) buona parte delle imprese ha meno di 100 mq di superficie;
- nel 78% dei casi (67 imprese su 86) le imprese possiedono un magazzino proprio.

#### 5. LA SIMULAZIONE PER SCENARI

Sulla base dei risultati econometrici e sfruttando la capacità del modello logit multinomiale di prevedere la probabilità di scelta degli intervistati, come sopra anticipato, è possibile studiare le scelte probabili in scenari predefiniti e simulare per questa via l'effetto probabile delle politiche di gestione del traffico merci.

Consideriamo inizialmente la probabilità di utilizzo del CDU rispetto al mezzo proprio da parte del campione

<sup>13</sup> In sostanza tale modello calcola, in relazione all'intero campione, la quota di mercato di una determinata alternativa di trasporto rispetto a tutte le altre.

<sup>14</sup> Tale simulazione è ottenuta semplicemente moltiplicando i valori dei coefficienti ottenuti per tutte le variabili descrittive le due alternative con i livelli assunti da esse in tutti gli esercizi di scelta sottoposti al decisore.

intervistato quando entrambe le alternative, o meglio gli attributi delle due alternative risultati significativi nel processo di scelta, assumono i seguenti (realistici) livelli:

**Alternativa CDU:** costo per consegna pari 3 Euro a collo e con 2 giorni di tempo tra l'arrivo della merce al CDU e la consegna al negozio;

**Alternativa Mezzo Proprio:** costo del permesso pari a 100 Euro l'anno, con la possibilità di parcheggiare accanto al luogo di consegna (0 metri);

Tale descrizione delle alternative costituisce quello che noi definiamo "Scenario base" che sarà considerato il punto di riferimento per esaminare l'impatto di scenari alternativi (introduzioni di politiche del traffico). Con riferimento allo scenario base, e come riportato dalla tabella 5 (presentata in coda al paper), ci sono 13 possibilità su 100 che una merce transiti per il CDU (87 via mezzi propri).

Tabella 5 – Simulazioni per l'intero campione\* e per singola filiera

	<i>Intero</i>	<i>fil1</i>	<i>fil2</i>	<i>fil3</i>	<i>fil4</i>	<i>fil5</i>	<i>fil6</i>	
	<i>CDU</i>	<i>MP</i>	<i>cdu</i>	<i>cdu</i>	<i>cdu</i>	<i>cdu</i>	<i>cdu</i>	<i>CDU</i>
B	13%	87%	10%	4%	17%	16%	5%	24%
B+1	29%	71%	13%	8%	50%	37%	8%	49%
B+2	21%	79%	23%	20%	22%	20%	4%	40%
B+3	27%	73%	18%	6%	32%	38%	17%	44%
B+4	25%	75%	12%	11%	29%	34%	44%	57%
B+1+2	41%	59%	28%	35%	58%	43%	7%	67%
B+3+4	44%	56%	21%	16%	49%	63%	77%	77%
B+1+2+3+4	78%	22%	48%	72%	87%	86%	84%	95%

\*Per intero campione si intende solo il numero delle osservazioni relative alle prime 5 filiere ovvero sono escluse le osservazioni riguardanti gli operatori di trasporto

#### Legenda

La codifica delle filiere é la seguente: Filiera1= alimentari; Filiera2= bar e ristoranti; Filiera3= abbigliamento; Filiera4= non abbigliamento; Filiera5=medie superficie; Filiera6= operatori di trasporto

La codifica degli scenari é la seguente:

B: costo CDU=3 euro, Tempo consegna=2gg, costo permesso=100 euro, distanza parcheggio=0m

B+1: costo CDU=0 euro, Tempo consegna=2gg, costo permesso=100 euro, distanza parcheggio=0m

B+2: costo CDU=3 euro, Tempo consegna=1gg, costo permesso=100 euro, distanza parcheggio=0m

B+3: costo CDU=3 euro, Tempo consegna=2gg, costo permesso=200 euro, distanza parcheggio=0m

B+4: costo CDU=3 euro, Tempo consegna=2gg, costo permesso=100 euro, distanza parcheggio=100m

B+1+2: costo CDU=0 euro, Tempo consegna=1gg, costo permesso=100 euro, distanza parcheggio=0m

B+3+4: costo CDU=3 euro, Tempo consegna=2gg, costo permesso=200 euro, distanza parcheggio=100m

B+1+2+3+4: costo CDU=0 euro, Tempo consegna=1gg, costo permesso=200 euro, distanza parcheggio=100m

A questo punto ipotizziamo che il *policy maker* locale adotti determinate politiche del traffico (e combinazioni di esse) in modo da incidere sulla probabilità che il CDU ottenga una maggior quota di mercato. La descrizione delle politiche é la seguente:

**Politica 1:** costo del servizio offerto dal CDU pari a zero. In questo caso l'autorità pubblica si assume tutti i costi del CDU e fornisce gratuitamente il servizio, operando una politica esclusivamente finanziaria dal lato dell'offerta;

**Politica 2:** i tempi di consegna del servizio offerto dal CDU si riducono da 2 a 1 giorno. Si assume in altre parole un incremento significativo dell'efficienza del CDU;

**Politica 3:** il costo del permesso passa da 100 a 200 euro. In questo caso l'autorità pubblica usa lo strumento di penalizzazione fiscale dal lato della domanda (si potrebbe pensare all'introduzione di misure di *road pricing* o *congestion charging* in area urbana);

**Politica 4:** la distanza tra il parcheggio possibile e il negozio in cui la merce viene consegnata diventa mediamente di 100 metri. Questo significa che l'autorità pubblica introduce, e fa rispettare, misure di restrizione significativa della sosta (alternativamente, si potrebbe pensare ad equivalenti misure di divieto o accesso regolamentato alle ZTL).

Per quanto riguarda l'intero campione (esclusi gli operatori di trasporto) alcuni dei risultati di interesse sono i seguenti:

- se è vero che le politiche P1 e P2 hanno lo stesso effetto di innalzare la probabilità di scelta del CDU esse impattano (in termini di carico finanziario) operatori diversi della catena, rispettivamente, l'operatore pubblico e l'operatore privato (nella doppia veste di operatore di trasporto e/o commerciale);
- la politica P4 agisce sui tempi e sulla facilità di carico e scarico. Eliminare il parcheggio al negozio (spesso illegale) allontanandolo mediamente di 100 metri ha l'effetto di innalzare la quota del CDU al 25%. In questo caso non c'è un aggravio monetario diretto, ma c'è una riduzione del numero di consegne per giornata ed un conseguente aumento dei costi che, almeno inizialmente, colpirebbe gli operatori del trasporto.

Per quanto riguarda le varie filiere, compresa quella degli operatori di trasporto, i risultati delle varie politiche<sup>15</sup> individuano comportamenti piuttosto differenziati:

- tra le politiche finanziarie, ovvero P1 e P3, quella che sortisce effetti migliori e la seconda che ha effetti importanti in quasi tutte le filiere, ad eccezione dei bar e ristoranti;
- Per quanto riguarda le politiche di efficienza (riduzione dei tempi di consegna), ovvero P2 e P4, mentre la prima ha effetti meglio distribuiti tra le varie filiere, ad eccezione delle medie superfici che mantengono la propria quota costante, la seconda impatta di più proprio quest'ultima filiera;
- con riferimento all'introduzione di pacchetti di politiche si può affermare che le politiche mirate esclusivamente al CDU fornirebbero ottimi effetti nella filiera dell'abbigliamento e del non-abbigliamento, mentre avrebbero effetti scarsi nelle medie superfici specializzate e contenuti sui bar e ristoranti. Al contrario le politiche di intervento sul traffico privato sarebbero molto efficaci sulle medie superfici, sul non-abbigliamento e sull'abbigliamento ma molto meno nelle filiere dei bar e ristoranti dell'alimentare. In riferimento a quest'ultima il pacchetto costituito da tutte le politiche ha scarsissimi effetti sulle probabilità di scelta delle due alternative

<sup>15</sup> In questo caso sono riportate solo le probabilità di utilizzo del CDU in quanto le probabilità dell'alternativa MP sono semplicemente il complemento ad 1 delle precedenti.

d) per quanto riguarda infine, la filiera degli operatori di trasporto, l'unico risultato degno di nota è che i trasportatori sono in ogni caso più propensi ad accettare il CDU rispetto ai negozianti. Infatti, già nello scenario base la probabilità di utilizzo del CDU è quasi doppia rispetto al dato medio (intero campione) delle altre filiere. Tutte le politiche (e pacchetti di politiche) pertanto, hanno effetti più incisivi.

## 6. CONCLUSIONI

Sebbene il TUM arrechi notevoli benefici (economie di urbanizzazione) a tutto il contesto cittadino, le criticità connesse, in termini di impatti ambientali e di congestione, hanno spinto e spingono i policy makers a adottare politiche ed interventi in grado di ridurre questi stessi effetti negativi. Una delle politiche implementabili consiste nell'installazione di Centri di Distribuzione Urbana (CDU) che pur rappresentando un tentativo ambizioso di cambiare la logistica urbana introducendo nel sistema strutture di consolidamento e razionalizzazione dei traffici, presentano però alcune criticità connesse soprattutto al grado di accettabilità della politica da parte degli attori interessati. Tale accettabilità del CDU da parte degli attori, ed in particolare degli operatori commerciali e dei trasporti, può essere studiata dal punto di vista teorico [1], empirico (o analisi *ex post* [16]) o attraverso l'analisi della struttura delle preferenze. Questo lavoro ha presentato i vantaggi ottenibili nel seguire questo terzo approccio, in termini di analisi della probabilità di scelta del CDU di ogni operatore per ogni scenario possibile.

## 7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Progetto City Ports. Progetto City Ports. Rapporto intermedio, *Quaderni del servizio pianificazione dei trasporti e logistica*, 5, Regione Emilia Romagna, Assessorato Mobilità e Trasporti, [http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/ERMES/Canali/trasporti/logistica\\_merci/pubbl\\_vol5/City\\_Ports\\_vol5](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/ERMES/Canali/trasporti/logistica_merci/pubbl_vol5/City_Ports_vol5), 2005a.
2. F. Boscacci, E. Maggi, La logistica urbana. Gli elementi conoscitivi per una governance del processo, cap. 1, Polipress, Milano, 2004.
3. D. Egger, M. Ruesch, Best Practice Handbook Year 3, *Final Report*, Project funded by the European Community under the 'Competitive and Sustainable Growth' Programme, [www.bestufs.net](http://www.bestufs.net), 2003.
4. SURF (1998), Sustainable Urban and Regional Freight Flows, [http://www.euroweb.net/surff/summary\\_report/report.htm](http://www.euroweb.net/surff/summary_report/report.htm), sito visitato il 05-09-2006, ore 23:16.
5. IDIOMA, (2001), Innovative Distribution with Intermodal Freight Operation in Metropolitan Area, <http://cordis.europa.eu/transport/src/48343.htm>, sito visitato il 05-09-2006, ore 23:50.
6. M. Huschebeck, J. Allen, Best Urban Freight Solutions II, *Deliverable D.1.1*, "Policy and Research

- Recommendations I. Urban Consolidation Centres, Last Mile Solutions", [www.bestufs.net](http://www.bestufs.net), 2005.
7. S.A. STRATEC, City Freight Project, Inter- and Intra-City Freight Distribution Network, *Final Report*, project homepage: <http://www.cityfreight.org>, 2005.
8. M. Browne, M. Sweet, A. Woodburn, J. Allen, Urban freight consolidation centres, *Final Report* for the Department of Transport, Transport Studies Group, University of Westminster, 2005.
9. S. D'Elia, D.C. Festa, G. Mazzulla, La distribuzione delle merci nell'area urbana di Cosenza: proposta di una struttura logistica innovativa, Centro Editoriale e Libraio, Università della Calabria, Rende, 2004.
10. E. Marcucci, R. Danielis, "Centri urbani di distribuzione delle merci e politiche del traffico: una valutazione empirica tramite le preferenze dichiarate", Paper presentato alla XXVII Conferenza Scientifica Annuale dell' AISRe, Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa, 2006.
11. G.M. Clark, W.B. Ashton, The Location and Sizing of Urban Freight Terminals with Multiple Planning Periods: the Urban Terminal Investment Model (UTIM), *Report FR 3491-TR-4*, Systems Research Group, Ohio State University, Columbus Ohio, 1977.
12. W.F. Friedman, Physical Distribution: the Concept of Shared Services, *Harvard Business Review*, 53(2), pp. 24-36, 1975.
13. C. Vaghi e M. Pastanella, Costi/Benefici di CityPorto, *ItaliaMondo. Logistica & Intermodalità*, Anno IX, n. 86, 2006.
14. E. Taniguchi, M. Noritake, T. Yamada, T. Izumitani, Optimal size and location planning of public logistics terminals, *Transportation Research – Part E*, vol. 35, pp. 207-222, 1999.
15. A. Lewis, Approaches to evaluating Consolidation Centre trials and projects, presentazione power point data al 1<sup>st</sup> BESTUFS II Workshop "Approaches to Urban Consolidation. Concepts and experiences", 13-14/01/2005, Londra, 2005.
16. T. Nemoto, Area-wide inter-carrier consolidation of freight in urban areas, *Transport Logistics*, vol. 1(2), pp. 87-101, 1997.
17. Progetto City Ports, Logistica urbana a Bologna: elementi per un progetto, *Quaderni del Servizio Pianificazione dei Trasporti e Logistica*, 8, Regione Emilia-Romagna, Assessorato Mobilità e Trasporti, [http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/ERMES/Canali/trasporti/logistica\\_merci/pubbl\\_vol8/Logistica%20urbana%20a%20Bologna\\_vol8.pdf](http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/ERMES/Canali/trasporti/logistica_merci/pubbl_vol8/Logistica%20urbana%20a%20Bologna_vol8.pdf), 2005b.
18. A.C. Regan, T. F. Golob, Trucking industry demand for urban shared use freight terminals, *Transportation*, vol. 32 (1), pp. 23-36, 2005.
19. E. Marcucci, (a cura di), Introduzione ai modelli a scelta discreta per lo studio dei trasporti, cap. 1, cap. 3 Carocci Editore, Roma, 2005.
20. G. Da Rios, D. Gattuso, La mobilità delle merci nell'area metropolitana milanese, cap. 1-3, F. Angeli, Milano, 2003.

## STATO DI AVANZAMENTO DELLE ATTIVITÀ PER L'ANNO 2007 DEL SISTEMA DI TRASPORTO INNOVATIVO PIPE\$NET

Franco Cotana, Federico Rossi, Mirko Amantini, Valerio Brunori, Andrea Marri

CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sugli Agenti Atmosferici), V. G. Duranti 67, 06125 Perugia

### SOMMARIO

Nel presente lavoro si illustra lo stato della ricerca relativo al sistema Pipe\$net (brevettato) e si descrivono gli avanzamenti nel progetto relativi allo sviluppo di alcuni sottosistemi, quali la sospensione senza contatto e la tecnologia del vuoto. Per quanto riguarda la sospensione sono state indagate due diverse soluzioni tecnologiche: la levitazione magnetica passiva a superconduttori e quella attiva con elettrocalamita. Per ciascuna delle due soluzioni si illustrano le teorie alla base dei fenomeni e le prove sperimentali che sono state realizzate per testare le suddette tecnologie e verificarne la fattibilità di applicazione al sistema Pipe\$net.

Nell'ambito della tecnologia del vuoto si riporta lo studio sul prototipo che è stato realizzato al fine di esaminare il comportamento delle strutture e dei sistemi proposti: tubo in polietilene ad alta densità corrugato, saldature di polietilene, guarnizioni e pompa del vuoto.

### INTRODUZIONE

“Pipe\$net” è un originale sistema di trasporto merci leggere (fino a 50 Kg) costituito da una rete di tubi in cui è mantenuto il vuoto, all'interno dei quali si muovono capsule ad alta velocità e basso attrito, spinte da motori elettrici lineari.

Le prerogative principali di Pipe\$net sono:

1. elevata capacità di trasporto, in virtù delle alte velocità combinate alle elevate frequenze di inoltro delle capsule;
2. ridotto consumo energetico;
3. decongestionamento del traffico su strada;
4. ridotto impatto ambientale in termini di emissioni inquinanti in atmosfera e di rumore;
5. rapidità di consegna della merce;
6. integrazione con le infrastrutture viarie (ferrovie, strade, percorsi pedonali) esistenti per realizzare i collegamenti in tempi ridotti e costi contenuti;
7. possibilità di estensione modulare della rete e diffusione capillare lungo il territorio.

Pipe\$net è un sistema flessibile: nella sua forma più articolata basata su tecnologie fortemente innovative quali la levitazione magnetica può collegare tratte di lunghezza superiore alle decine di chilometri sfruttando l'alta velocità garantita dall'attrito ridotto; nella sua forma semplificata, con tecnologie ampiamente consolidate, è adatto a connessioni locali, contribuendo in modo innovativo al miglioramento della mobilità, al decongestionamento del traffico e alla riduzione delle emissioni inquinanti sia atmosferiche che acustiche.

Da un'indagine statistica preliminare risulta che oltre il 70% delle merci attualmente movimentate su strada potrebbe essere trasportato con Pipe\$net.

Le caratteristiche tecniche del sistema Pipe\$net sono state illustrate in un precedente articolo [1].

In questo lavoro si presenta lo stato di avanzamento del progetto, illustrando le prove sperimentali condotte nel corso del 2006 relative in particolare ad alcuni sottosistemi di Pipe\$net, quali la sospensione senza contatto tramite levitazione magnetica e la tecnologia del vuoto.

### I PRECEDENTI PROTOTIPI

Prima dello svolgimento delle attività sperimentali descritte nel presente articolo, è stato realizzato un prototipo di lunghezza limitata, ma con caratteristiche del sistema finale, dove il movimento della capsula è generato da un motore sincrono lineare sottostante che produce un campo magnetico traslante con parametri opportunamente regolabili ai fini di consentire il moto desiderato (Figura 1).



Figura 1: primo prototipo di Pipe\$net

Il materiale usato per il tubo di contenimento è un corrugato di PEAD (polietilene ad alta densità), le cui proprietà meccaniche e chimico-fisiche sono tecnologicamente compatibili con le condizioni di esercizio del sistema: per questo motivo lo stesso materiale è stato impiegato anche nelle prove di vuoto descritte nel seguito.

Il prototipo è stato messo in funzione ed esposto presso il Vittoriano di Roma durante la mostra “i 60 anni della Repubblica italiana” svoltasi nei mesi di marzo e aprile 2006, scelto come progetto rappresentativo dell’innovazione italiana nel settore energia e trasporti.

## SOSPENSIONE SENZA CONTATTO

Nella sua configurazione ad alta velocità, il sistema Pipe§net trae beneficio dalla diminuzione degli attriti conseguenti al moto delle capsule nei tubi, impiegando tecnologie di sospensione senza contatto. Nel seguito si premette la definizione e una concisa descrizione delle differenti tipologie di sostentazione magnetica valutate nel corso della ricerca progettuale in oggetto:

- levitazione magnetica a Magneti Permanenti (nel seguito MP): sistema di sospensione passiva (mantenuta senza consumo di energia elettrica) che sfrutta la repulsione fra elementi magnetici con la stessa polarità;

- levitazione elettromagnetica (Electro Magnetic Suspension, nel seguito EMS): sistema di sospensione attiva (mantenuta con consumo di energia elettrica) in cui il peso del veicolo è contrastato tramite elettrocalamite attratte dalle guide metalliche del sistema;

- levitazione elettrodinamica (Electro Dynamic Suspension, nel seguito EDS): sistema di sospensione attiva costituita da potenti elettrocalamite (generalmente in superconduzione date le potenze in gioco) che muovendosi attraverso bobine non alimentate disposte lungo le guide del sistema vi inducono campi magnetici con polarità tali da sollevare il veicolo;

- levitazione con superconduttori passivi (High Temperature Superconductors, nel seguito HTS): sistema di sospensione passiva in cui il peso del veicolo è contrastato dalla repulsione indotta in un blocco di materiale superconduttore raffreddato a temperature criogeniche esposto a campi magnetici (in genere magneti permanenti), fenomeno denominato “effetto Meissner”.

A causa dell’intrinseca instabilità del sistema a MP e della complessità strutturale della EDS, i metodi di levitazione magnetica più promettenti per il sistema Pipe§net sono stati ritenuti la EMS e la sospensione per mezzo di HTS: su queste due tipologie si sono concentrati gli studi e le prove sperimentali nell’ambito del progetto Pipe§net.

## LEVITAZIONE MAGNETICA CON SUPERCONDUTTORI

### Cenni Storici e Teorici

Negli ultimi anni, con il progresso della tecnologia del freddo e con la scoperta di nuovi materiali superconduttori ad alta temperatura, ha assunto sempre più interesse l’impiego degli stessi per ottenere sistemi di sospensione magnetica ad attrito nullo.

Brevemente, si definiscono superconduttori quei materiali che, al di sotto di una data temperatura di transizione ( $T_c$ , temperatura critica), non oppongono alcuna resistenza al

passaggio della corrente elettrica ed espellono (completamente o in parte) i campi magnetici presenti al loro interno. La  $T_c$  dipende dalla natura del materiale, dalla densità di corrente che lo attraversa e dalla presenza di campi magnetici esterni. Questi fattori ostacolano l’instaurarsi della superconduttività e abbassano la  $T_c$ .

La temperatura di transizione dallo stato normale allo stato superconduttore per i metalli puri è di pochi gradi Kelvin al di sopra dello zero assoluto. La necessità di raggiungere temperature così basse aveva precluso le enormi potenzialità dei superconduttori e limitandone l’uso a pochi campi. Nel 1986 destò enorme sensazione la scoperta di una ceramica di ittrio, bario, rame e ossigeno, detta YBCO, che assumeva lo stato di superconduzione alla temperatura di circa 90 °K, tale da permettere di usare l’azoto liquido (alla temperatura di 77 °K) come refrigerante, molto più economico ed efficiente dell’elio fino a quel momento impiegato per tutti gli esperimenti e le applicazioni sulla superconduzione.

Nel 1933 due fisici tedeschi, Karl Walther Meissner e Robert Ochsenfeld, scoprirono che i superconduttori, oltre ad essere perfetti conduttori di elettricità, sono anche dei perfetti materiali diamagnetici, capaci cioè di espellere il flusso magnetico che contengono quando vengono raffreddati al di sotto della propria  $T_c$ , grazie alle supercorrenti di superficie che producono un campo magnetico esattamente opposto a quello esterno così da impedirne la penetrazione (Figura 2). La completa espulsione del flusso magnetico è nota oggi sotto il nome di “effetto Meissner”.

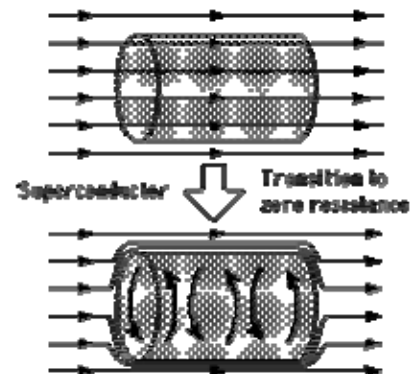


Figura 2: superconduttore immerso in un campo magnetico

Superconduttori di I e II tipo. L’evoluzione nel tempo delle conoscenze sulla superconduttività ha portato ad una classificazione dei materiali superconduttori in due tipi, indicati semplicemente con I e II. I superconduttori di tipo I tendono ad essere superconduttori in condizioni di bassa temperatura e debole campo magnetico; se il campo raggiunge una soglia critica, penetra nel materiale distruggendo lo stato di superconduzione.

I superconduttori di tipo II sono molto più utili: essi rimangono nello stato di superconduzione anche dopo la penetrazione del campo magnetico. L’YBaCuO e lo BiSrCaCuO sono esempi di superconduttori del II tipo: in questi, un campo magnetico esterno penetra nel materiale sotto forma di tubi di flusso discreti che formano intrusioni tubolari del campo applicato attorno alle quali circolano le supercorrenti (per questo si parla spesso di “vortici”). Queste supercorrenti producono un campo magnetico che tende a schermare il campo magnetico esterno applicato.

Sospensione senza contatto. La levitazione magnetica rappresenta una concreta applicazione dell'effetto Meissner.

Se si porta infatti un superconduttore al di sotto della sua temperatura critica e si pone sopra ad un magnete permanente (esercitante un campo inferiore a quello critico) si ha come conseguenza un comportamento perfettamente diamagnetico del superconduttore che espellendo le linee di flusso dal suo interno è sottoposto a una spinta levitativa. Nel caso di superconduttori di I tipo, l'azione levitativa però non garantisce l'equilibrio del sistema (la situazione è paragonabile a quella di due magneti permanenti in repulsione fra loro).

In un superconduttore di II tipo, invece, alcune linee di flusso del campo penetrano all'interno del superconduttore entrando nei vortici che si creano a causa delle imperfezioni e anisotropie del materiale: il superconduttore oltre ad essere soggetto alla forza levitativa dovuta alle linee di flusso respinte, è soggetto anche ad una forza di "pinning" che tende a bloccare il superconduttore e a non farlo muovere verso zone a diverso campo magnetico in una condizione di equilibrio che possiamo definire indifferente. La forza di "pinning" si manifesta infatti solo quando si spinge il superconduttore a muoversi verso una zona a campo magnetico diverso. Se la forza levitativa imposta dal campo magnetico è sufficiente a garantire la levitazione, contrariamente a quanto avviene per i superconduttori di I tipo, il superconduttore, se perturbato, si sposta verso una nuova posizione di equilibrio in cui vi è un medesimo valore del campo magnetico. Questa condizione può essere raggiunta in due modi: portando il superconduttore al di sotto della sua temperatura critica e poi forzandolo ad entrare in un campo magnetico oppure posizionando il superconduttore nel campo magnetico e raffreddandolo fino ad una temperatura minore di  $T_c$ . È proprio quest'ultimo metodo che è stato approfondito nelle prove di levitazione magnetica delle guide di Pipeşnet.

### Prove Sperimentali di Sospensione

Per le prove di sospensione di Pipeşnet sono stati scelti superconduttori di II specie ad alta temperatura (HTS) del tipo REBCO (Ossidi di Rame con Bario e Terre Rare) prodotti dalla THEVA Dünnschichttechnik GmbH (Figura 3).



Figura 3: blocchetto di YBCO

La scelta è caduta su superconduttori di II specie per due motivi:

1) possono essere portati allo stato superconduttivo refrigerandoli con azoto liquido a 77 °K, con ovvi vantaggi in termini di costi e difficoltà tecnologiche rispetto all'uso di elio liquido;

2) la forza di "pinning" permette il mantenimento del centraggio del superconduttore sulla pista magnetica. Se si fa transitare il superconduttore nello stato di superconduzione in opportune condizioni geometriche rispetto al magnete permanente, oltre alla forza levitativa, si ottiene anche una forza di "pinning" che permette il centraggio del superconduttore sulla pista e si oppone ad eventuali forze esterne che tendono a spostare il superconduttore trasversalmente rispetto all'asse della pista stessa, realizzando di fatto un sistema di guida passivo senza consumo di energia.

Le dimensioni dei blocchetti impiegati nelle prove svolte in laboratorio sono 64 x 33 x 12 mm.

I superconduttori sono stati fissati all'interno di due recipienti criogenici ottenuti con polistirene espanso ricoperto da uno strato di colla vinilica e carta.

I due recipienti sono stati collegati tramite una struttura leggera (peso poco superiore ad 1.8 Kg) di polistirolo e legno, denominata in seguito "navicella" (Figura 4), in modo da garantire l'allineamento assiale dei superconduttori fissati all'interno dei recipienti stessi (Figura 5).

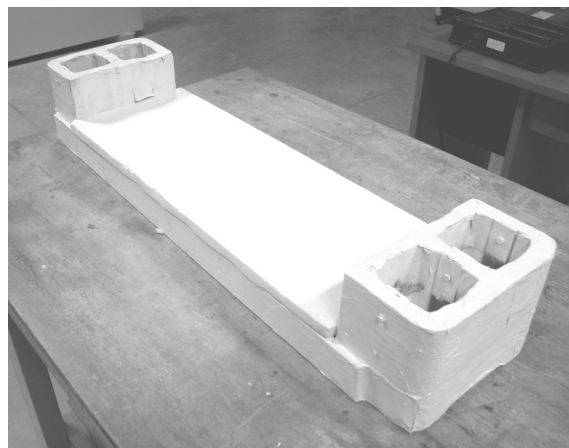


Figura 4: struttura complessiva del criostato

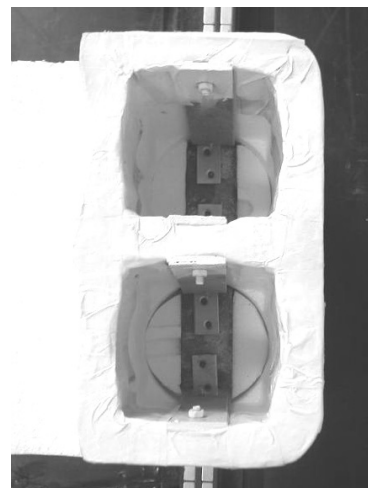


Figura 5: dettaglio del criostato con i superconduttori

Per quanto riguarda le piste magnetiche (Figura 6) sono state appositamente progettate a concentrazione di flusso per garantire flusso magnetico massimo in corrispondenza dell'asse longitudinale del superconduttore e massimo gradiente in direzione perpendicolare all'asse della pista

stessa. Da un esame della letteratura scientifica (ad es. [2]), risulta infatti che la forza levitativa ottenibile è proporzionale all'intensità  $B$  del campo magnetico applicato esternamente al superconduttore, mentre la forza di "pinning" è anche influenzata dal gradiente di  $B$ .



Figura 6: piste di magneti montate sul tubo

Ciascuna pista lunga circa 2 metri è costituita da una struttura a sandwich (Figura 7), realizzata da SAIMAG srl e formata (a partire dall'esterno) da:

- due lamiere di ferro dolce piegate a L di spessore 2 mm e altezza 28 mm; queste fungono anche da base di ancoraggio alla struttura del prototipo;
- due strati di magneti NeFeB (aventi un campo magnetico residuo  $B_r=1.2$  Tesla) di spessore 8 mm ed altezza 28 mm (la lunghezza del singolo magnete è di 30 mm);
- una lastra centrale di ferro dolce di spessore 4 mm ed altezza 28 mm.

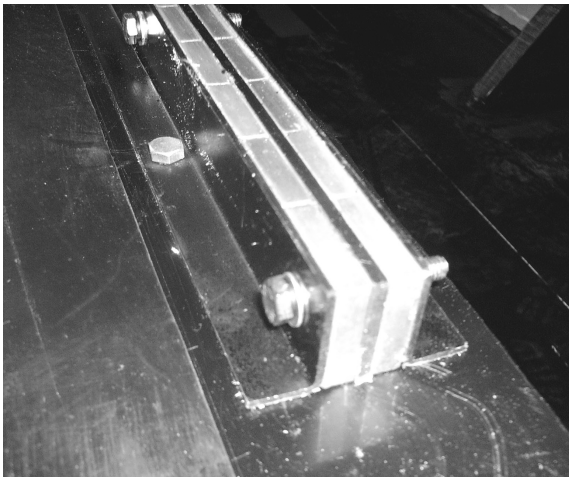


Figura 7: particolare della pista di magneti

Il campo magnetico generato dal magnete permanente non si disperde nello spazio circostante ma rimane concentrato totalmente nella zona sovrastante la pista stessa. Il massimo del campo magnetico sull'asse della guida è evidenziato anche dal picco del grafico di Figura 8 che rappresenta l'andamento della componente verticale del campo di flusso  $B$  in direzione perpendicolare all'asse ad una distanza di 1 mm dalla superficie del magnete permanente; il valore raggiunto è prossimo a 1 Tesla.

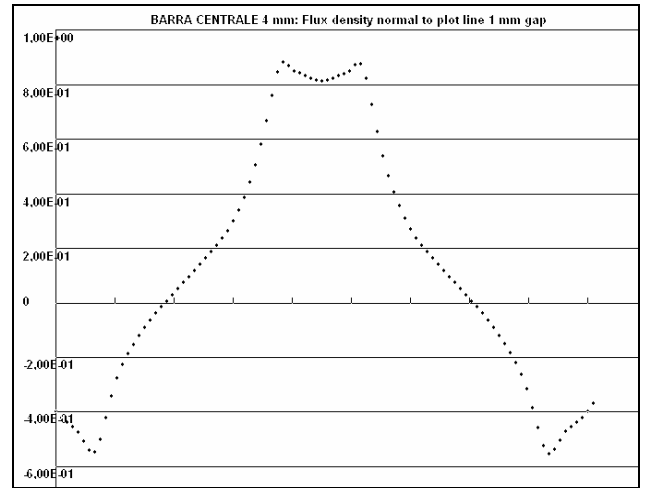


Figura 8: andamento della componente verticale di  $B$

Tentando di allontanare il superconduttore trasversalmente rispetto all'asse della guida si ha una elevata variazione della intensità del campo magnetico che genera una elevata forza di "pinning" che si oppone alla traslazione laterale del superconduttore sopra il magnete; la conseguente variazione delle supercorrenti interne è energeticamente sfavorevole.

Con la strumentazione sopra descritta sono state eseguite due diverse prove: la prima a campo zero ossia i superconduttori sono stati portati al di sotto della temperatura critica al di fuori del campo magnetico esercitato dalle piste; la seconda prova è stata realizzata raffreddando i superconduttori ad una distanza fissa di 10 mm dalla superficie superiore delle piste. Di seguito si descrive ciascuna prova e i risultati ottenuti.

Prova a campo zero. Il recipiente criogenico, posto in un piano lontano dal campo magnetico prodotto dalle piste (campo magnetico zero), è riempito con azoto liquido. Dopo un tempo di attesa di 5 minuti, necessario ai superconduttori per passare allo stato superconduttivo, si pone il criostato sopra le piste. Si fa attenzione a far coincidere l'asse delle piste con l'asse delle coppie di superconduttori su ciascun recipiente (Figura 9).

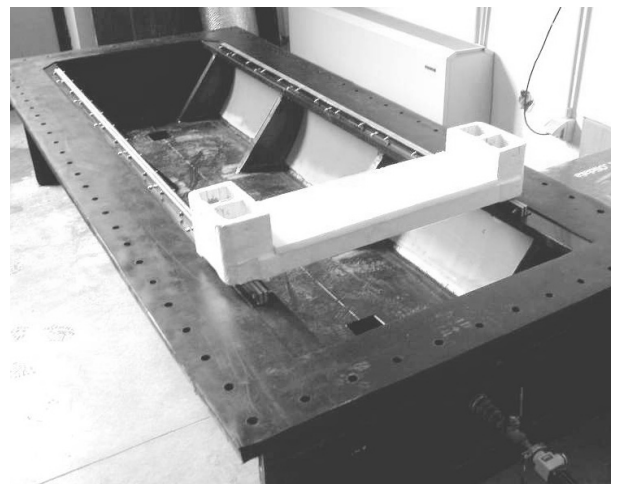


Figura 9: criostato disposto sopra le piste di magneti

Dalla prova si possono trarre le seguenti conclusioni: il criostato non è stabile sopra le piste di magneti permanenti ossia tende a spostarsi di lato e disporre il proprio asse

parallelamente a quello delle guide; vi è una assenza completa della forza di “pinning” e l’equilibrio è instabile.

Il fenomeno non contraddice le proprietà dei superconduttori di II specie, infatti il sistema è stato raffreddato a campo zero ed è stato posto in seguito sopra il campo magnetico prodotto dalle guide; ciò significa forza levitativa massima e forza di “pinning” nulla. Forzando il sistema ad avvicinarsi alla superficie superiore della pista (la distanza iniziale tra pista e superconduttore in cui forza peso e forza levitativa si eguagliano è di 8 mm) alcune linee del campo magnetico penetrano nel superconduttore. Eliminando la forza coercitiva di avvicinamento si nota che la forza levitativa è diminuita essendo ora la distanza tra piste e superconduttore minore e che si è manifestata anche una piccola forza di “pinning” dovuta appunto all’imprigionamento delle linee di forza nei vortici creati nel superconduttore stesso.

Dalla misura della forza levitativa, effettuata posizionando dei pesi crescenti sulla navicella fino ad ottenere un *gap* tra superconduttore e magneti permanente di 5 mm, è stato ottenuto il valore di 160 N.

La misura è stata effettuata con un *gap* di 5 mm poiché è quella minima che si ritiene si debba garantire a causa delle oscillazioni attorno alla posizione di equilibrio della navicella causate da discontinuità del campo magnetico lungo la pista stessa.

L’impiego di questo tipo di procedura per raffreddare i superconduttori non è efficace al fine dell’applicazione su Pipe\$net poiché non viene garantita una forza di “pinning” sufficiente ad assicurare il centraggio della navicella sulla guida.

Prova a campo non zero. Il criostato è posto sulle piste magnetiche, facendo attenzione all’allineamento assiale fra le piste e la stessa navicella, sopra alcuni spessori di plastica (altezza totale 10 millimetri). In questo modo il campo magnetico a cui sono soggetti i superconduttori durante la transizione non è nullo.

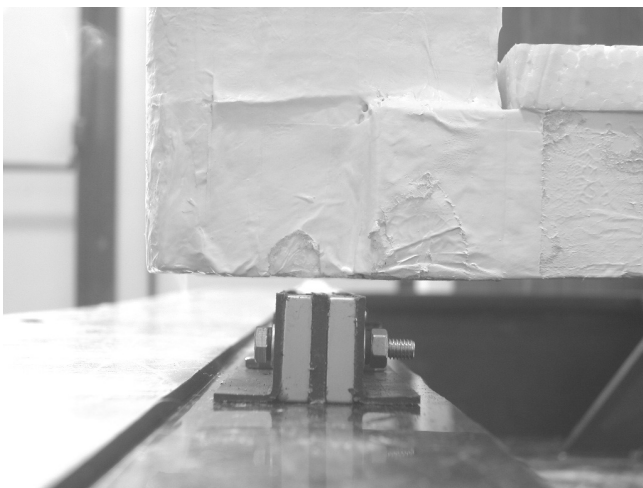


Figura 10: levitazione

Si riempie poi ciascun vano dei recipienti criogenici con azoto liquido. Dopo un tempo di attesa di 5 minuti si tolgono gli spessori. A causa del peso della capsula il *gap* iniziale tra navicella e pista magnetica tende a diminuire. Si ha l’equilibrio ad una distanza di 8 mm (Figura 10).

Da questa prova risulta che i superconduttori sono soggetti ad un’elevata forza di “pinning” oltre che alla forza di

levitazione. La forza di pinning così ottenuta è dello stesso ordine di grandezza di quella di levitazione e garantisce il rispetto del centraggio della navicella sulle guide.

Si lasciano a sperimentazioni successive le misure dei rapporti di grandezza tra le due e dei principi che governano le loro relazioni.

Dalle prove svolte si è potuto vedere come l’aumentare della forza di “pinning”, ottenibile diminuendo la distanza a cui il sistema è raffreddato allo stato superconduttivo, produce un rapido decadimento della forza di levitazione magnetica.

Dalla misura della forza levitativa, effettuata posizionando dei pesi crescenti sulla navicella fino ad ottenere un *gap* tra superconduttore e magneti permanenti di 5 mm, è stato ottenuto il valore di 70 N.

Questo tipo di procedura di raffreddamento sembra appropriata all’implementazione su Pipe\$net. A discapito di una minore forza levitativa, che rispetto al raffreddamento a campo zero diminuisce di più della metà, si ha una elevata forza di “pinning” che permette il centraggio e il mantenimento della coassialità tra piste e navicella. Rimandiamo a studi futuri il comportamento del sistema in condizioni dinamiche e di alta velocità di traslazione della navicella sulle guide.

## SOSPENSIONE ELETTROMAGNETICA

È in via di conduzione uno studio volto a definire l’applicabilità per il sistema Pipe\$net di un tipo di sospensione senza contatto basata sulla levitazione elettromagnetica (EMS, Electro-Magnetic Suspension). Il principio, attualmente sfruttato nel Maglev Transrapid sviluppato dalla ThyssenKrupp e operativo nel collegamento fra l’aeroporto e la città di Shanghai, si basa sull’attrazione esercitata da una serie di magneti permanenti verso il materiale ferromagnetico di cui è costituito il motore elettrico lineare che permette la propulsione. Questa attrazione vince la forza peso della capsula, ma non garantisce un equilibrio stabile perché al diminuire del traferro la forza d’attrazione aumenta e viceversa.

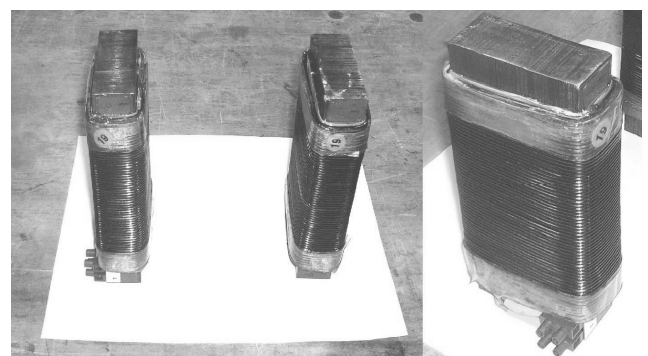


Figura 11: elettrocalamite realizzate da TRAFOMECA

È necessario pertanto inserire un campo magnetico variabile con la distanza della capsula dai motori elettrici lineari, in modo da aumentare l’intensità del campo magnetico e quindi l’attrazione se la capsula tendesse ad allontanarsi dal suo traferro di progetto e, viceversa, in modo da diminuire il campo magnetico a vantaggio della forza peso, se la capsula dovesse avvicinarsi ai motori rispetto alla sua posizione d’equilibrio. Questo comportamento può essere realizzato con

un'elettrocalamita, tramite un controllo a catena chiusa che misura costantemente la distanza fra la capsula e i motori elettrici lineari (impiegando un laser micrometrico MICRO-EPSILON ILD1401-20 allo scopo) e comanda un variatore di corrente che regola l'intensità del campo magnetico generato dalle spire dell'elettromagnete.

Gli elettromagneti (due per consentire un controllo sulle dislocazioni di beccheggio della capsula), realizzati dalla TRAFOMECC di Tavernelle (PG) sono visibili nella Figura 11.

Il dimensionamento dell'elettrocalamita è stato effettuato partendo dall'ipotesi di poter bilanciare un carico complessivo di 10 kg, garantendo un traferro massimo di 3 mm.

Indicando con  $t$  il traferro,  $N$  il numero di spire e con  $S$  la sezione del nucleo, deve valere la seguente disuguaglianza:

$$\frac{\mu_0 S (NI_{\max})^2}{2t_{\max}^2} > mg \quad (1)$$

Scegliendo una sezione del nucleo rettangolare di 7 cm x 3 cm si ottiene  $NI_{\max} > 818A$ . Ponendo  $N = 120$  si ottiene  $I_{\max} > 6.82A$ .

Considerando 2 strati di avvolgimento ed un filo di raggio  $r = 1\text{mm}$ , è possibile calcolare la potenza massima dissipata che vale  $P_{\max} = RI_{\max}^2 = 6.51W$ . La densità di corrente massima sviluppata è  $\delta_{\max} = 2.17 A/\text{mm}^2$ .

La dinamica dell'elettrocalamita è descritta dalla seguente equazione

$$\ddot{z} = g - k \frac{i^2}{z^2} \quad (2)$$

essendo  $i$  la corrente che scorre al suo interno,  $z$  la distanza dal ferro (traferro) e  $k$  una costante data da:

$$k = \frac{\mu_0 S N^2}{2m} \quad [\text{m}^3 / \text{A}^2 \text{ s}^2] \quad (3)$$

L'equazione precedente può essere scissa in un sistema di 2 equazioni differenziali del primo ordine

$$\begin{cases} \dot{z} = v \\ \dot{v} = g - k \frac{i^2}{z^2} \end{cases} \quad (4)$$

Sia  $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z \\ v \end{pmatrix}$  il vettore delle variabili di stato,

$u = i$  il segnale di ingresso e  $y = z$  il segnale di uscita, la dinamica dell'elettromagnete può essere modellata con il seguente sistema non lineare nello spazio di stato

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g - k \frac{u^2}{x_1^2} \end{cases} \quad (5)$$

Il sistema è stato linearizzato intorno al punto di equilibrio,  $x_{1,\text{eq}} = 0.002 \text{ m}$  e  $u_{\text{eq}} = 4.5445 \text{ A}$ .

Per la sintesi del regolatore digitale viene discretizzato il sistema conservando tutte le pulsazioni in corrispondenza di una risposta in frequenza del sistema sopra ai  $-20\text{dB}$  rispetto alla risposta in continua. Questo corrisponde alla pulsazione  $\omega_0 = 300 \text{ rad/s}$  e in base al teorema di Nyquist il periodo del campionamento deve essere  $T_s \leq \pi / \omega_0 = 0.0105 \text{ s}$ .

La sintesi del regolatore è stata quindi effettuata mediante tecnica FTR (Finite Time Response) imponendo errore nullo a regime per ingressi costanti tramite l'inserimento di un polo in  $z=1$  in catena aperta e cancellando il polo stabile con uno zero in  $z=0.3714$ . ottenendo il seguente controllore:

$$R(z) = \frac{-12077.864(z - 0.3714)(z - 0.8232)}{(z - 1)(z + 0.8646)} \quad (6)$$

Il completo allestimento dell'esperimento è previsto per il secondo trimestre 2007. Durante le prove si prevede di verificare l'opportunità di controllare il traferro variando le correnti statoriche così da evitare l'alimentazione delle capsule.

## PROVE DI VUOTO

Per effettuare test di tenuta e resistenza sul materiale selezionato per i tubi di Pipeşnet, in collaborazione con la ditta FUTURA S.r.l. ed ITALIANA CORRUGATI S.r.l., è stato realizzato un tubo prototipo di 2,5 metri di lunghezza (Figura 12) che impiega due semigusci ricavati da tubi standard di diametro 100 cm in PEAD (polietilene ad alta densità) corrugato a doppia parete, con classe di rigidità anulare SN8 (pari a 8 kN/m<sup>2</sup>) misurata secondo UNI EN ISO 9969. Il volume interno è circa 1400 litri.



Figura 12: tubo per prova di vuoto

Quattro lastre di PEAD complanari all'asse del tubo sono saldate ai semigusci per fornire mensole di appoggio alle piste di magneti per le eventuali prove di levitazione; le mensole sono rinforzate per garantire la necessaria stabilità dimensionale (Figura 13).

Un'altra serie di lastre è saldata nel semiguscio inferiore per fungere da struttura di supporto per i motori elettrici lineari (Figura 13).

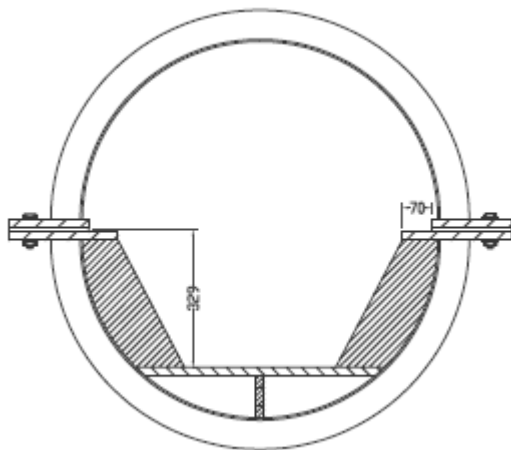


Figura 13: sezione del tubo per la prova di vuoto

Infine 4 piastre di PEAD di spessore 30 mm sono saldate alle estremità per garantire la tenuta del sistema. A causa delle sollecitazioni previste in seguito alla differenza di pressione fra interno ed esterno del tubo (forza superiore alle 2 tonnellate), ogni piastra è stata rinforzata saldando 2 costolature in PEAD di sezione quadrata 30 x 30 mm.

Le due sezioni sono assemblate con bulloni lungo i 4 lati; una guarnizione in gomma fornisce la necessaria tenuta. Una pompa rotativa a palette Leybold da 16 m<sup>3</sup>/h è collegata al tubo per generare la depressione (Figura 14).

La pressione minima raggiunta nel corso del primo esperimento è stata di 80 mbar (pari a 1/13 circa di atmosfera) in 30 minuti. A chiusura della valvola, il sistema ha evidenziato una caduta di pressione di 3.3 mbar/min.

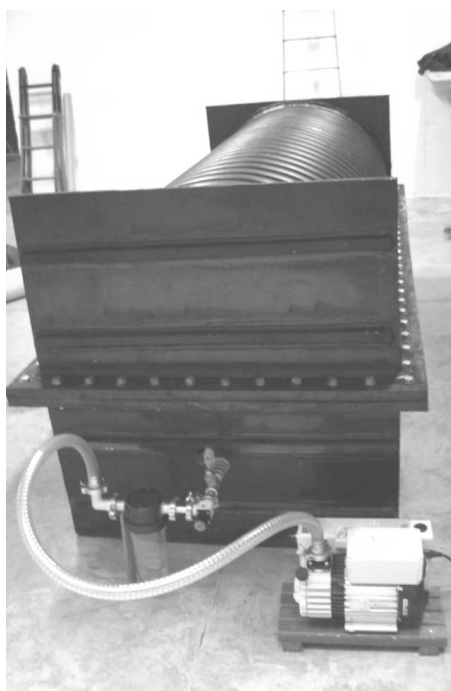


Figura 14: pompa applicata per la prova di vuoto

In seguito si sono individuate le perdite dovute a difettosità nella lavorazione di saldatura: i fori sono stati individuati mettendo in pressione il tubo e cospargendolo di materiale che genera bolle in presenza di fuoriuscite d'aria. In prossimità dei fori è stato effettuato un intervento correttivo di saldatura.

La pressione finale raggiunta dopo l'intervento è stata pari a 40 mbar (1/25 di atmosfera) in 30 minuti e la caduta di pressione è migliorata a circa 1 mbar/min.

Considerando che la pompa impiegata ha una potenza di 0.55 kW, trascurando la variazione della caduta di pressione e della velocità di aspirazione con la pressione interna al tubo, si ottiene con un calcolo di massima una potenza consumata per il mantenimento delle condizioni di vuoto prestabilite pari a circa 6÷7 kW / km.

Per quanto concerne la resistenza dei materiali la configurazione corrugata del tubo ha dimostrato di sostenere adeguatamente le forti sollecitazioni dovute alla differenza di pressione. L'inflessione riscontrata nelle piastre terminali (prossima ai 20 mm al centro delle stesse) non è da ritenersi un problema nel sistema Pipe§net in quanto le linee saranno costituite da tubi senza soluzione di continuità.

Si rimanda a prove ulteriori lo studio dell'influenza della guarnizione collocata fra i due semigusci sulle perdite di tenuta, la valutazione del contributo all'impedenza del sistema da parte dei raccordi fra il tubo e la pompa e il funzionamento del motore elettrico lineare in condizioni di vuoto.

## CONCLUSIONI

Nel corso del 2006 lo sviluppo del sistema di trasporto Pipe§net si è focalizzato sull'elaborazione di prove sperimentali volte a definire le potenzialità tecnologiche di alcuni suoi sottosistemi fondamentali, quali la sospensione con levitazione magnetica e la tecnologia del vuoto.

Per quanto concerne la levitazione, la tecnologia dei superconduttori ad alte temperature ha evidenziato potenzialità di successo molto promettenti, ma tali da richiedere ulteriori studi per verificarne l'applicabilità nella gestione di carichi pesanti in condizioni di elevata dinamicità. Nell'ambito della levitazione per mezzo di sospensione elettromagnetica si sta mettendo a punto un prototipo per lo studio della stessa da completarsi entro il 2007.

Riguardo la tecnologia del vuoto, è stato verificato il ridotto consumo energetico della metodologia impiegata, con un valore indicativo di 6÷7 kw/km per il mantenimento delle condizioni di vuoto all'interno della linea Pipe§Net.

## NOMENCLATURA

$g$	accelerazione di gravità	[m/s <sup>2</sup> ]
$I_{max}$	intensità di corrente massima	[A]
$m$	massa	[kg]
$R$	resistenza	[Ω]
$\mu_0$	permeabilità magnetica del vuoto	[H/m]

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. F. Cotana, F. Rossi, A. Marri, Pipe§net: un sistema di trasporto merci innovativo confronto delle prestazioni con i sistemi di trasporto su gomma e ferroviario, *Atti 6° Congresso Nazionale CIRIAF*, pp. 443-448, 2006.
2. X. R. Wang, H. H. Song, et al., Levitation force and guidance force of YBaCuO bulk in applied field, *Physica C*, 386, pp. 536-539, 2003.



## L'IMPATTO AMBIENTALE DEI PORTI: UNA TASSONOMIA METODOLOGICA E POLITICA

Gerardo Marletto

Dipartimento di Economia, Impresa, Regolazione  
Università di Sassari, Via di Torre Tonda 34, 07100 Sassari, marletto@uniss.it

### SOMMARIO

Nello studio degli impatti ambientali della navigazione l'attenzione è stata dedicata prevalentemente agli effetti ambientali dei servizi di trasporto marittimo, tralasciando gli impatti delle funzioni direttamente connesse alla costruzione e alla gestione dei porti. Solo di recente – con la crescita dirompente dei traffici nei porti, specie in quelli asiatici – vi è stata una maggiore attenzione da parte delle scienze naturali, per l'identificazione e la classificazione degli impatti ambientali dei porti e per la fissazione di criteri per la loro misurazione. E' necessario che ad essa si affianchi anche la ricerca economica; per dare un contributo alla misurazione degli impatti ambientali e, soprattutto, alla definizione delle politiche pubbliche per la loro riduzione.

L'articolo dà conto dei risultati intermedi di una ricerca sull'impatto ambientale dei porti, con riferimento a due filoni di approfondimento: la misurazione degli impatti ambientali e le politiche per la loro riduzione. I due filoni sono sviluppati in termini generali, per dare conto brevemente dello stato dell'arte dell'economia dei trasporti e dell'ambiente e, in termini più specifici, per analizzare la letteratura che ha cominciato a dedicarsi allo specifico tema dei porti.

### 1. LA RICERCA ECONOMICA SUI TRASPORTI E L'AMBIENTE: UNA VISIONE D'INSIEME

#### 1.1. La misurazione dell'impatto ambientale dei trasporti

Per lo sviluppo e l'applicazione di metodi per la misurazione degli impatti ambientali dei trasporti sono stati elaborati approcci tra loro strutturalmente diversi (Marletto, 2006 [1]).

La prima famiglia di approcci si basa su criteri di aggregazione dei diversi impatti ambientali dei trasporti (inquinamento globale, inquinamento locale, consumo di suolo, ecc.). Tra questi il più diffuso e consolidato è certamente quello della valutazione economica; si tratta di un approccio che ha trovato applicazione non solo a livello nazionale (Lombard e Molocchi, [2], [3] e [4]) o continentale (Infras e Iww, [5]), ma anche per corridoi (Recordit, [6]) ed aree locali e regionali (Amici della Terra, [7]). Un secondo criterio di aggregazione, meno consolidato, è quello della "impronta ecologica", sviluppato per valutare il consumo umano di risorse naturali, calcola l'impatto ambientale dei trasporti come quota dell'impatto totale (Wwf e Cras, [8] e [9]) o come impatto di un singolo mezzo di trasporto (Chambers, Simmons e Wackernagel, [10]).

La seconda famiglia di approcci non cerca invece di ridurre per la sua diffusa applicazione va segnalato in particolare l'approccio che assegna un indicatore a ciascuna dimensione dell'impatto ambientale, con la possibilità di costruire indicatori ponderati di livello superiore. Set di indicatori sono stati elaborati ed applicati ai trasporti sia da organismi istituzionali (Eea, [11]; Ocse, [12]) che da centri di ricerca (Issi, [13]; Legambiente, [14]).

Possono essere utilizzate anche analisi statistiche multivariate che consentono, al contrario del caso precedente,

di mantenere nell'analisi la metrica specifica di ciascuna dimensione dell'impatto ambientale; si tratta di tecniche usate frequentemente dagli scienziati naturali (biologi, ecologi, ecc.) che non hanno sinora avuto applicazioni economiche rilevanti.

La terza famiglia di approcci si basa sulle valutazioni soggettive in materia di impatto ambientale e trova più facilmente applicazione nella fase che precede la costruzione di una nuova infrastruttura di trasporto o il suo ampliamento. Un primo approccio di questo tipo è quello demoscopico, che fa uso di strumenti di rilevazione generali (indagini a campione tramite questionario) e specifici (Delphi, *focus group*, *deliberative polling*, ecc.).

Un secondo approccio si affida a procedure di partecipazione popolare alla valutazione degli impatti; in questo caso le metodologie utilizzate (di qualunque natura esse siano) sono solo uno strumento preliminare della valutazione vera e propria che assume la natura di una procedura decisionale e trovano particolare applicazione nei casi di costruzione o ampliamento delle infrastrutture di trasporto (Pellizzoni, [15]; AA.VV., [16]).

#### 1.2. Le politiche per la riduzione dell'impatto ambientale dei trasporti

La ricerca economica sulle politiche più appropriate per la riduzione dell'impatto ambientale dei trasporti può fare riferimento a due paradigmi alternativi di intervento pubblico nell'economia (Marletto, 2006 [17]).

Il paradigma ortodosso si basa sulle teorie economiche che considerano gli impatti ambientali dei trasporti come un fallimento del mercato. Gli strumenti d'intervento preferiti in questo paradigma sono stati tradizionalmente eterogenei (Daniellis, [18]): divieti di circolazione in particolari aree o fasce temporali, imposizione degli standard Euro sui veicoli

stradali, fissazione di pedaggi per l'accesso alle infrastrutture o alle aree urbane (Saleh, [19]; De Palma et al., [20]), internalizzazione dei costi ambientali attraverso le tasse sui carburanti (Ocse, [21]); programmi nazionali ed europei per la riduzione del trasporto stradale di merci e la promozione del trasporto intermodale (Commissione europea, [22] e [23]).

Più di recente, sempre all'interno del paradigma ortodosso, si è manifestata una decisa preferenza per la concorrenza, che si è manifestata in due distinte modalità: la riapertura alla libera competizione dei mercati (o liberalizzazione) e l'applicazione di strumenti di simulazione della concorrenza (o regolazione incentivante) nei pochi settori dove non ci sono alternative all'intervento pubblico. La liberalizzazione ha portato ad una necessaria evoluzione dell'azione pubblica in campo ambientale, dalle tradizionali azioni di comando e di controllo al rafforzamento delle norme di carattere generale che vanno dalla configurazione della responsabilità e del reato ambientale, alla promozione di strumenti e linee-guida di auto-regolazione e certificazione ambientale, per arrivare al ricorso alle assicurazioni contro i danni ambientali (Ocse, [24]). La regolazione concorrenziale ha invece obbligato ad incorporare gli obiettivi di natura ambientale negli strumenti incentivanti che normano i rapporti tra pubbliche amministrazioni e gestori imprenditoriali dei servizi pubblici di trasporto; va comunque sottolineato che si tratta di un'opportunità sino ad oggi poco sfruttata (Hidson e Muller, [25]). Sono da segnalare infine quei casi d'intervento in cui il mercato corrispondente all'impatto ambientale non esiste e deve essere creato proprio con un intervento pubblico. Esempio più eclatante di questo filone è certamente quello dei permessi d'inquinamento scambiabili, assunti a rilevanza mondiale grazie al Protocollo di Kyoto, di cui però esistono poche applicazioni allo specifico caso dei trasporti (Raux, [26]).

Il paradigma non ortodosso fa capo ai diversi filoni di teoria economica che hanno concentrato la loro analisi sulle determinanti strutturali dello sviluppo, facendo riferimento principalmente la loro attenzione su tre fattori: le istituzioni, i valori e le tecnologie. Se in passato questo paradigma si è interessato delle questioni ambientali solo da un punto di vista teorico, esso oggi si misura anche con le applicazioni concrete per lo sviluppo sostenibile.

Sul versante istituzionale, questo approccio – riconoscendo esplicitamente la ineguale distribuzione del potere tra i soggetti che operano nel mercato – punta a incrementare la partecipazione democratica nelle decisioni che hanno una rilevante connotazione ambientale. Con riferimento al caso dei trasporti si possono identificare alcune importanti esperienze estere (Spinedi, [27]): la *public inquiry* inglese, il *débat public* francese e il referendum confermativo svizzero; quest'ultimo in particolare ha confermato che dalla partecipazione popolare può venire una decisiva spinta all'adozione di piani per il trasporto sostenibile (Ufficio federale dello sviluppo territoriale, [28]).

Sul versante dei valori, si deve registrare uno spostamento nell'incentivazione dei comportamenti di trasporto ambientalmente compatibili, dagli strumenti economici a quelli non economici. In particolare nel caso dei trasporti sono da segnalare le campagne per la sensibilizzazione in tema di sicurezza e di impatto ambientale; un caso emblematico in questo senso è certamente quello inglese (Dipartimento dei trasporti, [29]).

Sul versante delle tecnologie, il paradigma non ortodosso propone un originale approccio schumpeteriano che considera l'innovazione come una modalità fondamentale di relazione tra l'uomo e l'ambiente e la politica industriale come strumento

prioritario per la riconversione ecologica del sistema economico. Anche nel settore dei trasporti l'obiettivo è dunque la transizione verso tecnologie radicalmente nuove (Kemp e Rotmans, [30]), sperimentando prima "nicchie" e poi attivando nuovi "regimi" di trasporto sostenibile (Hogma et al., [31]). È importante sottolineare che in questa visione l'attenzione non è dedicata esclusivamente alle sole innovazioni tecnologiche; al contrario anche le innovazioni di carattere organizzativo sono considerate fondamentali, se in grado di introdurre cambiamenti strutturali della mobilità nella direzione di una maggiore compatibilità ambientale. Esempi tipici di questo tipo sono gli interventi al livello urbano per l'integrazione tra il trasporto collettivo tradizionale, il *bike* e *car-sharing* e i cosiddetti servizi flessibili (Ambrosino et al., Huwer, [32]).

### 1.3. I problemi aperti

Nello stato attuale della ricerca sul rapporto tra trasporti e ambiente due appaiono le aree problematiche.

a) Nel filone dei metodi di misurazione degli impatti.

Gli studi di valutazione dell'impatto normalmente si basano normalmente su un solo metodo; addirittura si può rilevare che esistano comunità di ricerca per ciascun metodo (economisti applicati per la valutazione economica; ecologisti per l'impronta ecologica e gli indicatori; architetti e sociologi per gli approcci soggettivi) e che il dialogo scientifico tra tali comunità sia sostanzialmente inesistente.

b) Nel filone delle politiche per la riduzione degli impatti.

La maggiore propensione degli economisti a preferire il paradigma ortodosso ha portato sino ad oggi l'economia e la politica dei trasporti ad approfondire maggiormente lo studio e l'applicazione di strumenti per la riduzione dei danni ambientali legati a meccanismi di incentivazione economica (tasse e pedaggi "verdi", diritti d'inquinamento, assicurazioni). Ne è derivata di converso una decisamente minore attenzione all'uso della politica industriale ed istituzionale per modificare le caratteristiche strutturali del sistema dei trasporti e ridurre di conseguenza i danni ambientali.

## 2. L'IMPATTO AMBIENTALE DEI PORTI: UNA PRIMA RASSEGNA

La letteratura sull'impatto ambientale dei porti – e in particolare quella di matrice economica – è decisamente scarsa. Le considerazioni che seguono si riferiscono ad un numero ridotto di articoli e documenti (che sperabilmente aumenteranno col tempo e col procedere della ricerca sottostante questo articolo); per evitare ripetuti riferimenti alle stesse fonti, le si segnalano tutte insieme qui (tra parentesi i porti oggetto di studio): Alba et al. [33] (studio sul Porto di Gijón - Spagna), Bateman [34] (porti del Queensland australiano), Bailey e Solomon [35] (porti di Oakland - California e di Helsinki), CPDP [36] (porto di Nizza), Gupta et al. [37], Peris-Mora et al. [38] (porto di Valencia), Peterlin et al. [39] (porto di Koper/Capodistria).

### 2.1. La classificazione delle fonti e degli impatti

Tra le questioni affrontate dalla letteratura sull'impatto ambientale dei porti, una è propedeutica a qualsiasi valutazione e azione successiva: la classificazione sia delle fonti generatrici di danni ambientali, sia delle stesse categorie di danno ambientale.

Nell'operare queste classificazioni è corretto il richiamo di alcune fonti alla necessità di tenere distinte le considerazioni nel caso di: costruzione di nuovi porti, sviluppo di porti esistenti, gestione di porti esistenti. Assunto questo richiamo iniziale, la letteratura converge nell'identificare le seguenti fonti generatrici di danno ambientale (intendendo il danno ambientale in senso lato e comprendendo quindi anche gli impatti di tipo sanitario):

- i movimenti dei mezzi marini, sia delle navi che dei mezzi portuali (piloti, rimorchiatori, ecc.);
- i movimenti dei mezzi terrestri, per la movimentazione e il trasporto delle merci (quindi non solo camion e treni, ma anche macchinari per il carico e scarico dalle navi delle merci);
- la produzione di rifiuti, che va intesa in senso generale, comprendendo non solo i rifiuti in senso stretto (ad esempio lo scarico a terra degli assimilabili agli urbani prodotti dalle navi), ma anche gli scarichi di sostanze inquinanti: innanzitutto a mare (si pensi al problema sempre più sentito dell'importazione di organismi a agenti esotici a causa del lavaggio delle cisterne o dello scarico delle acque di sentina), ma anche a terra (si pensi all'accumularsi al suolo di sostanze contaminanti);
- i dragaggi, che provocano due tipi di danni: di tipi ambientale in senso stretto (con l'alterazione dei fondali e dell'habitat marino) e di ulteriore produzione di rifiuti (in alcuni casi assimilabili ai tossici e nocivi)
- le altre attività legate al porto, di cantieristica navale (costruzione e manutenzione), di produzione industriale (a partire da quella della trasformazione dei prodotti della pesca) e di logistica (con particolare riferimento allo stoccaggio di merci pericolose).

Anche sulle categorie di danno ambientale generate dai porti la letteratura converge su una classificazione relativamente stabile:

- l'inquinamento atmosferico, da distinguere tra danni alla scala globale, generati in larga parte dalla movimentazione dei mezzi, e danni alla scala locale, dove alle emissioni dei mezzi si somma la circolazione di polveri causata dalla movimentazione di particolari tipi di merce (carbone, materiali ferrosi, materiali da costruzione) e a i quali secondo alcuni dovrebbe essere aggiunta anche la generazione di cattivi odori;
- l'inquinamento del mare, anch'esso da distinguere tra impatti di superficie, dovuti principalmente agli sversamenti e alla movimentazione dei mezzi, impatti profondi sui fondali e sull'habitat marino in genere;
- l'uso e l'inquinamento del suolo, da intendersi nella triplice accezione di: consumo di suolo necessario per la costruzione del porto, contaminazione del suolo causata dalle attività portuali di terra e impatto negativo sul paesaggio (tema, quest'ultimo, cruciale nel débat public che ha accompagnato il progetto di creazione di una nuova banchina per le crociere nel porto di Nizza);
- l'inquinamento acustico, generato da tutte le attività portuali, di mare e di terra, e dalle attività di trasporto generate dal porto;
- gli incidenti, da intendere sia come collisioni tra mezzi navali (e più in generale di tutti i mezzi di trasporto legati al porto), sia come sversamenti a mare e a terra di sostanze inquinanti, sia eventi gravi associati allo stoccaggio di merci pericolose.

## 2.2. La misurazione degli impatti

La misurazione degli impatti è logicamente la fase successiva alla loro identificazione e classificazione. Ma già su quest'aspetto la letteratura si rivela decisamente insufficiente.

Nelle fonti reperite come base di questo articolo è infatti possibile trovare un solo caso di utilizzo di un sistema di indicatori, riferito alla misurazione degli impatti ambientali generati dal porto di Valencia in Spagna (misurazione realizzata all'interno di un più generale programma di gestione ambientale). In questo caso, a partire da 67 categorie di potenziali impatti ambientali, sono stati elaborati 17 indicatori ambientali. E' da segnalare in questo caso anche il riferimento a metodologie demoscopiche per integrare le informazioni eventualmente mancanti con i risultati derivati da indagini Delphi e da *panel* di esperti.

Si può evidenziare anche l'esistenza di un caso di applicazione del metodo dell'impronta ecologica; anche questo realizzato in Spagna, nel caso del porto di Gijón. E' stato in particolare calcolato un impatto ambientale equivalente a oltre 3.000 ettari di terreno ecologicamente produttivo (assimilabile all'impronta ecologica generate mediamente da 200 famiglie in un anno), la gran parte derivanti dal consumo di energia associato alle attività portuali.

Un ultimo studio interessante riguarda il porto di Koper/Capodistria. In questo caso sono state rilevate le valutazioni soggettive di alcune categorie di impatto ambientale del porto (inquinamento dell'aria e del mare, rumore) comparate a quelle di altre attività svolte nell'area (agricoltura, trattamento dei rifiuti, industria, turismo, traffico stradale, riscaldamento domestico). Ne è emerso un quadro non lontano dalla reale distribuzione degli impatti tra le diverse fonti; mentre – com'è del resto da aspettarsi – è evidente la sottostima del peso degli impatti portuali da parte della popolazione direttamente o indirettamente coinvolta nelle attività portuali.

## 2.3. Gli interventi per la riduzione degli impatti

La letteratura su questo punto è ancora più rara, ma ciò è dovuto anche allo specifico ritardo delle politiche ambientali nel settore delle attività portuali (che si somma al più generale ritardo delle politiche sul trasporto marittimo, rispetto in particolare a quelle sul trasporto stradale).

La legislazione internazionale e quella dei principali Paesi interessati dalle attività portuali è infatti generalmente insufficiente: in campo portuale sono infatti inesistenti i riferimenti normativi al principio del "chi inquina paga" (traduzione corrente della internalizzazione dei costi esterni propugnata dall'economia ambientale ortodossa), così come sono molto deboli standard ambientali specifici (con la sola eccezione di quelli imposti dall'EPA negli Stati Uniti).

Qualche diffusione cominciano ad avere gli strumenti di tipo volontario, come gli accordi promossi in California o le linee-guida per l'uso dei programmi di gestione ambientale (basati sulle norme EMAS e ISO rilevanti) come strumento attivo di miglioramento della sostenibilità dei porti, diffuse prima nel Queensland e poi a tutti i porti australiani. A questo proposito è importante evidenziare il riferimento al rapporto tra la misurazione degli indicatori di impatto ambientali, la individuazione di *target* di miglioramento per ciascuno di essi e la individuazione delle procedure necessarie per il loro raggiungimento.

Sono invece del tutto assenti misure per l'adozione e la diffusione delle innovazioni che potrebbero ridurre, anche significativamente, l'impatto ambientale dei porti. La letteratura segnala infatti che le opportunità in campo portuale generate potrebbero essere infatti moltissime, con riferimento:

- sia all'innovazione tecnologica: uso delle celle di combustibile e di altre fonti energetiche rinnovabili per i generatori di terra e *off-shore*, catalizzazione dei mezzi marini, miglioramento dei carburanti e dei sistemi di propulsione dei mezzi marini e terrestri (con l'uso dei diesel a basso contenuto di zolfo, del gasolio bianco e dei bio-diesel), diffusione degli spray inertizzanti contro le polveri, ecc.;
- sia all'innovazione organizzativa: maggiore ricorso alla modalità ferroviaria per i trasporti terrestri, generazione *off-shore* per la produzione dell'energia delle navi ferme in porto, riduzione della tenuta al minimo dei mezzi portuali, ecc.

Non si può inoltre mancare di riportare anche la possibilità di stimolare attraverso appropriate politiche le opzioni innovative più radicali:

- la delocalizzazione dei porti al di fuori dei centri urbani (che comporta la riduzione drastica degli impatti sanitari sulla popolazione circostante il porto), realizzabile più facilmente nel caso di progetti di sviluppo e di estensione del porto;
- la diminuzione dei traffici marittimi globali – e, quindi, delle movimentazioni in porto – grazie alla promozione del consumo di prodotti locali; ciò comporterebbe una diversa finalizzazione dei programmi di promozione dei prodotti locali (si veda ad esempio il caso “*buy California*”).

Sempre in materia di politiche va infine segnalato l'importante filone della partecipazione alla decisioni. A questo proposito va senz'altro citata l'esperienza pionieristica del *débat public* francese che tra il 2001 e il 2002 ha discusso in modo pubblico e formale il progetto di espansione del porto di Nizza. In questo caso – come in quello già citato del porto di Koper/Capodistria – è emerso il problema degli interessi contrastanti in materia di costruzione e sviluppo dei porti, che vede da una parte la parte della comunità che è contraria per i disagi che ciò comporta e dall'altra quanti sono favorevoli per i benefici economici che direttamente e indirettamente vengono generati.

## 2.4. I problemi aperti

Come già indicato in apertura di questo capitolo, il problema più rilevante in materia di impatto ambientale dei porti è certamente l'insufficiente sviluppo di una specifica letteratura, specialmente di matrice economica. Questo deficit di ricerca in entrambi i filoni qui considerati.

a) Nel filone della misurazione degli impatti portuali.

La scarsità generale degli studi diventa totale assenza nel caso dei metodi di valutazione economica dei costi esterni; ciò è particolarmente grave tenuto conto che questo metodo di misurazione è stato sino ad oggi il più utilizzato nel settore dei trasporti. Ne risulta l'impossibilità di operare comparazioni tra la quantificazione dei costi esterni portuali e quelli in generale associati alle attività di trasporto in genere.

b) Nel filone delle politiche per la riduzione degli impatti portuali.

Come già evidenziato, in questo caso il ritardo della letteratura è in parte dovuto anche al ritardo generale di

sensibilità politica sul tema. Il ritardo riguarda sia gli strumenti tradizionali (come gli standard) che quelli innovativi (come gli accordi volontari); sia gli interventi ortodossi (ad esempio l'internalizzazione dei costi esterni) sia quelli non ortodossi (ad esempio il sostegno ai processi di innovazione ambientale).

## 3. ALCUNE CONCLUSIONI

I due filoni della misurazione degli impatti ambientali e delle politiche per la loro riduzione soffrono di un insufficiente produzione di ricerca, con particolare riferimento a quella di matrice economica.

L'applicazione di criteri di classificazione ad entrambi i filoni consente di passare dalla mera analisi descrittiva della poca letteratura disponibile, alla individuazione delle attività di ricerca meritevoli di futuri approfondimento. Tra queste vanno senz'altro segnalate la diffusione dei metodi di misurazione degli impatti portuali di cui è già stata tentata una sperimentazione (sistemi di indicatori, rilevazioni delle preferenze, impronta ecologica) e l'applicazione del più diffuso e consolidato metodo di valutazione economica, quello dei costi esterni.

L'uso criteri generali di classificazione evidenzia inoltre la necessità di approfondire l'intero filone delle politiche, sviluppando l'analisi delle normative e delle esperienze sino ad oggi eventualmente non trasposte nella letteratura scientifica e approfondendo il potenziale di applicazione degli interventi ortodossi e non ortodossi di politica ambientale studiati (se non già applicati) negli altri segmenti del sistema dei trasporti.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Marletto G., Metodi per l'aggregazione dei danni generati dai trasporti: impronta ecologica e valutazione economica a confronto, Atti del VI Congresso nazionale del Ciriaf, Morlacchi Editore, Perugia, 2006a
2. Lombard P. L. e Molocchi A., I costi ambientali e sociali della mobilità in Italia, Milano, Franco Angeli, 1999
3. Lombard P. L. e Molocchi A., Produzione, esercizio e smaltimento dei mezzi di trasporto: i costi ambientali e sociali, Milano, Franco Angeli, 2001
4. Lombard P. L. e Molocchi A., Navigazione e ambiente: un confronto con i costi esterni delle altre modalità di trasporto, Milano, Franco Angeli, 2002
5. Infrac-Iww, External costs of transport - Update study, Parigi, Uic, 2004
6. Recordit, External cost calculation for selected corridors, Stoccarda, Ier, 2001
7. Amici della Terra, Valutazione del vantaggio, in termini di minori costi ambientali e sociali, di un forte sviluppo del trasporto, Roma, Enea, 2003
8. Wwf e Cras, Calcolo dell'impronta ecologica della Regione, Roma, Regione Toscana, 2002
9. Wwf e Cras, L'impronta ecologica delle regioni dell'obiettivo 1 del QCS 2000/2006 – Un contributo per valutare lo sviluppo sostenibile, Roma, Wwf e Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, 2004
10. Chambers N., Simmons C. e Wackernagel M., Manuale delle impronte ecologiche - Principi, applicazioni, esempi, Milano, Edizioni Ambiente, 2002
11. EEA-European Environmental Agency, "TERM. Ten

- key transport and environment issues for policymakers", Report N° 3/2004, Copenhagen
12. Ocse, Performance indicators for the road sector, Oecd Publications, Paris, 2001
  13. Issi-Istituto sviluppo sostenibile Italia, Un futuro sostenibile per l'Italia, 1° Rapporto ISSI, Roma, Editori Riuniti, 2002
  14. Legambiente, Ecosistema urbano 2005. Undicesimo rapporto sulla qualità ambientale dei comuni capoluogo di provincia, Roma, 2005.
  15. Pellizzoni L. (a cura di), La deliberazione pubblica, Roma, Meltemi, 2005
  16. AA. VV., Politiche pubbliche, pratiche partecipative, democrazia deliberativa, governance territoriale, Stato e mercato, numero monografico, 1/2005
  17. Marletto G., La riduzione dei danni ambientali generati dai trasporti: spunti per un approccio non ortodosso, in "Economia delle fonti d'energia e dell'ambiente", vol. XLVIII, n. 1, Franco Angeli, Milano, 2006
  18. Danielis R., I trasporti e l'ambiente, Torino, Giappichelli Editore, 1996
  19. Saleh, W. (a cura di), Road User Charging: Theory and Practices. Transport Policy, 12, 373-476, 2005
  20. de Palma, A., Lindsey, R. e Proost S. (a cura di), Modelling of Urban Road Pricing and its Implementation. Transport Policy, 13, 97-176, 2006
  21. Ocse, Internalising the Social Costs of Transportation. Oecd Publications, Paris, 1994
  22. Commissione Europea, European transport policy for 2010: time to decide – White Paper. European Communities, Luxembourg, 2001
  23. Commissione Europea, Keep Europe moving – Sustainable mobility for our continent. Mid-term review of the European Commission's Transport White Paper. European Communities, Luxembourg 2006
  24. Ocse, Market and Government Failures in Environmental Management – The case of Transport. Oecd Publications, Paris, 1992
  25. Hidson, M. e Muller, M., Better Public Transport through Competitive Tendering – A Good Practice Guide. ICLEI, Freiburg, 2003
  26. Raux, C., The use of transferable permits in transport policy. Transportation Research Part D, 9, 185-197, 2004
  27. Spinedi M. (a cura di), La gestione dei conflitti locali nelle opere infrastrutturali: il caso dei trasporti, Bologna, Inchiostri Associati, 1999
  28. Ufficio federale dello sviluppo territoriale, Attraverso le Alpi, Uste, Berna, 2001
  29. Dipartimento dei trasporti, Tomorrow's roads – safer for everyone: The first three years review, DFT, London, 2004
  30. Kemp, R. e Rotmans, J., Managing the Transition to Sustainable Mobility. In: B. Elzen. et al. (a cura di) System Innovation and the Transition to Sustainability: Theory, Evidence and Policy, Edgar Elgar, Cheltenham, 2004
  31. Hogma, R., Kemp, R., Schot, J. And Truffer, B., Experimenting for Sustainable Transport: The Approach of Strategic Niche Management, Routledge, Oxford, 2002
  32. Ambrosino, G., Nelson, J. D. e Romanazzo, M., Demand Responsive Transport Services: Towards the Flexible Mobility Agency, ENEA, Rome, 2004
  33. Alba J., Díaz E. e Doménech J. L., Estudio de indicadores ambientales portuarios: la huella ecológica del puerto de Gijón. Autoridad Portuaria de Gijón, 2003
  34. Bailey D. e Solomon G., Pollution prevention at ports: clearing the air, Environmental Impact Assessment Review, vol. 24, pp. 749-774, 2004
  35. Bateman S, Environmental issues with Australian ports, Ocean & Coastal Management, vol. 33, pp. 229-247, 1996
  36. CPDP, Débat public sur le projet d'extension du port de Nice. Compte-rendu du débat public, Nice, France, 2002
  37. Gupta A.K., Gupta S.K., Rashmi S.P., Environmental management plan for port and harbour projects, Clean Technologies and Environmental Policies, vol. 7, pp. 133-141, 2005
  38. Peris-Mora E., Diez Orejas J.M., Subirats A., Ibanez S., Alvarez P., Development of a system of indicators for sustainable port managements, Marine Pollution Bulletin, vol. 50, pp. 1649-1660, 2005
  39. Peterlin M., Kontic B., Kross B. C., Public peception of environmental pressures within the Slovene coastal zone, Ocean & Coastal Management, vol. 48, pp. 189-204, 2005



**PREMIO “MAURO FELLI” 2007**



## EFFETTO INIBITORIO DI BACILLI DI DIFFERENTE SPECIE SULL'ATTIVITA' BIOLOGICA DI UN NITROARENE (4-NQO) E DI UN AGENTE ALCHILANTE (MNNG)

Francesca Gonfia<sup>1</sup>, Giovanni Cenci<sup>2</sup>, Francesco Bistoni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sezione di Microbiologia, Dipartimento di Medicina Sperimentale e Scienze Biochimiche, e

<sup>2</sup>Dipartimento Biologia Cellulare e Ambientale,  
Università degli Studi di Perugia, Via del Giochetto, 06122 Perugia.

### SOMMARIO

Nel tratto gastro-intestinale dell'uomo e degli animali possono essere ritrovati numerosi xenobiotici, esogeni o endogeni. I primi sono introdotti con l'alimentazione, gli altri sono originati dal metabolismo dell'ospite o sono prodotti dalla popolazione microbica residente a livello intestinale. La flora intestinale e l'ospite costituiscono un ecosistema complesso ed aperto nel quale più specie microbiche vivono in una relazione simbiotica che risulta spazio-temporalmente determinata e variabile in relazione a fattori ambientali, alimentari e fisio-patologici dell'ospite. La microflora intestinale può esercitare un ruolo favorevole o sfavorevole per l'ospite e pertanto è indispensabile che i rapporti tra le componenti microbiche normalmente rappresentate non subiscano sproporzioni rilevanti. Nei casi di dismicrobismo intestinale di varia origine ed in particolare a seguito di terapia antibiotica prolungata è ormai entrata nell'uso comune la somministrazione per via orale di preparati farmaceutici o di alimenti funzionali contenenti "microrganismi probiotici", ovvero determinati ceppi microbici "vivi" che siano in grado di originare un corretto riequilibrio della microflora. Scopo del presente lavoro è valutare il ruolo inibitorio dei batteri del genere *Bacillus* nei confronti dell'attività di due genotossine di riferimento (4-nitrochinolina-N-ossido (4-NQO) e N-metil-N'-nitro-N-nitrosoguanidina (MNNG)).

### INTRODUZIONE

E' noto che in relazione a vari processi evolutivi tutti gli organismi viventi hanno messo a punto meccanismi adattativi che ne permettono la capacità di migliorare la sopravvivenza nei confronti di situazioni ambientali particolari. Va però evidenziato che ciò risulta estremamente difficile in presenza di composti genotossici e mutageni, i quali sono in grado di incidere negativamente oltre che sulle normali caratteristiche fisiologiche e metaboliche degli organismi esposti anche sul loro codice genetico.

Nell'ambito di tale problematica riveste particolare importanza il ruolo che vari microrganismi possono svolgere al riguardo essendo stata ormai evidenziata la loro elevata capacità reattiva anche nei confronti di specie chimiche xenobiotiche, la cui struttura appare di solito recalcitrante nei confronti della degradazione biologica (Vorobjeva & Abilev 2002).

E' pertanto giustificato considerare l'importanza del comportamento microbico in relazione alla presenza di composti chimici indesiderati nel contesto ambientale in senso lato e, più in particolare ai fini di tale studio, per il conseguente ruolo antigenotossico e antimutageno che determinati microrganismi sembrano essere in grado di esplicare nell'intestino.

Nel tratto gastro-intestinale dell'uomo e degli animali infatti possono essere ritrovati numerosi xenobiotici, esogeni o endogeni. I primi sono introdotti con l'alimentazione (es. nitrosamine, idrocarburi policiclici aromatici, aflatosine, edulcoranti vari), gli altri sono originati dal metabolismo dell'ospite o sono prodotti dalla microflora.

La microflora anaerobia obbligata (es. *Clostridium* e *Bacteroides*) può avere un coinvolgimento diretto nella

produzione di nitrosocomposti, agenti alchilanti, acidi biliari secondari, fecapentaeni, etc. e quella anaerobia facoltativa (alcune *Enterobacteriaceae* e altri batteri saprofiti e patogeni) nella liberazione, mediante attività batteriche deconiuganti ( $\beta$ -glucuronidasi e  $\beta$ -glucosidasi), di agliconi tossici a partire da

composti coniugati prodotti dal fegato o da glucosidi vegetali introdotti con l'alimentazione (Cenci *et al* 1993 a, b).

La flora intestinale e l'ospite costituiscono un ecosistema complesso ed aperto nel quale più specie microbiche vivono in una relazione simbiotica che risulta spazio-temporalmente determinata e variabile in relazione a fattori ambientali, alimentari e fisio-patologici dell'ospite (Holzapfel *et al* 1998). A seconda dei casi la microflora intestinale può esercitare un ruolo favorevole o sfavorevole e di conseguenza è indispensabile che i rapporti tra le componenti microbiche normalmente rappresentate non subiscano sproporzioni rilevanti.

Nei casi di dismicrobismo intestinale di varia origine ed in particolare a seguito di terapia antibiotica prolungata è ormai entrata nell'uso comune la somministrazione per via orale di preparati farmaceutici o di alimenti funzionali contenenti "microrganismi probiotici", ovvero determinati ceppi microbici "vivi" che siano in grado di originare un corretto riequilibrio della microflora (Fuller 1989; Vaughan & Mollet 1999).

Alcune delle caratteristiche ottimali di batteri probiotici sono state già descritte in letteratura (Saarela *et al* 2000). Attualmente, sta trovando particolare interesse il riscontro in alcuni ceppi - soprattutto lattobacilli e bifidobatteri - della capacità di ridurre il rischio genotossico e mutageno a livello intestinale (Hirayama & Rafter 2000; Brady *et al* 2000; Rolfe

2000; Lo *et al* 2002; Cenci 2003; Guarner & Malagelada 2003).

Il presente lavoro ha lo scopo di valutare il ruolo inibitorio dei batteri del genere *Bacillus* nei confronti dell'attività di due potenti genotossine caratterizzate da diverso meccanismo d'azione: 4-nitrochinolina-N-ossido (4-NQO) e N-metil-N'-nitro-N-nitrosoguanidina (MNNG).

Il nitroarene 4-NQO è comunemente impiegato come composto di riferimento per valutare la genotossicità di composti nitroaromatici ed è attivo sia nei confronti di cellule eucariotiche che su cellule procariotiche (Nagao & Sugimura 1976). A livello intracellulare il nitrogruppo viene ridotto ad opera della riduttasi CytP450 originando 4-idrossilamminochinolina-N-ossido (4-HAQO), fortemente reattiva, in grado di interagire con la seril-tRNA sintetasi. Il prodotto di questa reazione è la seril-4-HAQO, che ha come bersaglio principale la guanina e determina transizioni GC → AT. Il danno al DNA prodotto da 4-NQO risulta analogo a quello causato dalle radiazioni UV (Matsushima & Sugimura 1971).

La MNNG agisce secondo un meccanismo tipico delle nitrosamine, composti che comunemente si formano in seguito a modificazione di aminogruppi delle proteine in presenza di nitrati. E' un composto genotossico e cancerogeno e viene impiegato come riferimento per la valutazione dell'attività di altri composti (amidi, nitrosamine, etc). A livello intracellulare la MNNG è convertita in catione metildiazonio (CH<sub>3</sub><sup>+</sup>), che possedendo una forte attività alchilante è in grado di metilare la guanina in posizione O<sup>6</sup>. La base così modificata si lega alla timina determinando una transizione GC → AT in corrispondenza alla successiva replicazione del DNA (Nadathur *et al* 1994).

Lo studio è stato orientato alla valutazione dell'effetto inibitorio sull'attività biologica dei predetti composti a seguito della loro coincubazione con i bacilli ed ha avuto le seguenti finalità:

- esaminare l'attività dei bacilli nei confronti delle due genotossine: 4-NQO e MNNG;
- analizzare il ruolo in tal senso di ceppi di specie correlate: *B. clausii* e *B. subtilis*.

## MATERIALI E METODI

### Ceppi batterici

In questo studio sono stati impiegati complessivamente 5 ceppi batterici del genere *Bacillus*, appartenenti alle specie *Bacillus clausii* e *Bacillus subtilis*. Come indicato in [Tabella 1](#), essi provengono da collezioni internazionali.

Tabella 1. Batteri impiegati e loro provenienza

SPECIE	N	CEPPI	PROVENIENZA
<i>Bacillus clausii</i>	3	8716, 9783, 2512	Collezione DSM
<i>Bacillus subtilis</i>	2	549, 779	Collezione ATCC

### Terreni di coltura

Sono stati impiegati i seguenti terreni di coltura: [Nutrient Broth](#) (NB) per la coltivazione dei bacilli; [Nutrient Agar](#) (NA) per le conte dei batteri; [Soil Extract Agar](#) (SEA) per indurre la

sporificazione dei batteri, [LB medium](#) (LB) per la coltivazione di *E. coli* PQ37.

### Tamponi

#### Tampone B

Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 16.1 g, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 5.5 g, KCl 0.75 g, MgSO<sub>4</sub> • 7H<sub>2</sub>O 0.25 g, SDS 1 g, β-mercaptoetanolo 2.7 mL, H<sub>2</sub>O deionizzata 1 L, pH 7, per il saggio della β-galattosidasi nel metodo SOS-Chromotest.

#### Tampone P

Tris(idrossimetil)aminometano (C<sub>4</sub>H<sub>11</sub>NO<sub>3</sub>) 121 g, SDS 1 g, H<sub>2</sub>O deionizzata 1 L, pH 8.8, per il saggio della fosfatasi alcalina nel metodo SOS-Chromotest e per la preparazione del substrato PNPP.

#### Tampone acetato pH 5

Acido acetico 0.1 M, acetato di sodio 0.1 M, per la preparazione della soluzione madre di MNNG.

#### Tampone fosfato pH 7

Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> • 7H<sub>2</sub>O 0.1 M 61 mL, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> • H<sub>2</sub>O 0.1 M 39 mL, pH 7, per la preparazione del substrato ONPG.

### Substrati

#### Substrato ONPG

Soluzione di O-nitrofenil-β-D-galattopiranoside (Sigma), 4 mg/mL, ottenuta sciogliendo 400 mg di ONPG in 100 mL di tampone fosfato, pH 7, per la determinazione della β-galattosidasi.

#### Substrato PNPP

Soluzione di p-nitrofenil fosfato disodico (Sigma), 4 mg/mL, ottenuta sciogliendo 400 mg di PNPP in 100 mL di tampone P, per la determinazione della fosfatasi alcalina.

### Agenti Genotossici

Sono stati impiegati due agenti genotossici: la 4-Nitrochinolina-N-ossido (4-NQO) e la N-metil-N-nitro-N-nitrosoguanidina (MNNG).

### Coltivazione e conservazione dei batteri

I bacilli pervenuti sotto forma di spore sono stati rivitalizzati prelevando 100 μL della sospensione ed inoculandoli in 10 mL di Nutrient Broth a pH 8. Analogamente, nel caso dei batteri pervenuti in forma liofilizzata, la rivitalizzazione è stata ottenuta con Nutrient Broth. Per osservare le macrocolonie è stato utilizzato il terreno agarizzato Nutrient Agar posto in piastre Petri.

La conservazione dei ceppi è stata fatta utilizzando il terreno Soil Extract Agar in grado di favorire il processo di sporulazione. Le spore ottenute sono state conservate a + 4 °C.

### Conta delle cellule batteriche

La conta delle cellule vitali prima e dopo il contatto con la genotossina è stata effettuata mediante diluizioni decimali in soluzione fisiologica e successivo conteggio delle colonie in piastre di Nutrient Agar. Sono state esaminate diluizioni nell'intervallo 10<sup>-5</sup> – 10<sup>-9</sup> includendo in 20 mL di terreno agarizzato aliquote di 1 mL, con incubazione a 37 °C per 24 - 48 ore.

## SOS-Chromotest

Il test è stato eseguito come descritto precedentemente (Quillardet & Hofnung 1985). Le densità ottiche risultanti dalla lettura spettrofotometrica sono convertite in unità enzimatiche secondo la formula usata per calcolare le unità enzimatiche convenzionali (Miller 1972):

$$\text{Unità enzimatiche} = 1000 \times A_{405}/t$$

In questa formula,  $A_{405}$  è la densità ottica dei campioni letta a 405 nm,  $t$  è il tempo di incubazione in presenza del substrato, espresso in minuti.

Il rapporto  $R$  fra  $\beta$ -galattosidasi e fosfatasi alcalina riflette l'induzione dei geni *sfiA::lacZ* anche quando si sia verificata una qualche inibizione della sintesi proteica. Questo rapporto è calcolato come segue:

$$R = \text{Unità di } \beta\text{-galattosidasi} / \text{Unità di fosfatasi alcalina.}$$

Per poter paragonare gli effetti ottenuti in differenti esperimenti è conveniente normalizzare il rapporto  $R_{(C)}$ , a concentrazione  $C$  dividendo questo per il suo valore  $R_{(O)}$ , a concentrazione  $O$  del composto saggiato.

Il fattore di induzione corretto SOS è pertanto:

$$IF_{SOS} = R_{(C)} / R_{(O)}$$

Per quantificare l'eventuale attività antigenotossica dei ceppi del genere *Bacillus* nei confronti della genotossina usata, il valore  $IF_{SOS}$  determinato nei sovranatanti di coincubazione viene trasformato in Attività residua della molecola secondo la formula:

$$\text{Attività residua} = IF_{(\text{coincubazione})} / IF_{(C+)} \times 100$$

La percentuale di inibizione della genotossicità viene espressa come complemento a 100 dell'Attività residua.

## Coincubazione dei ceppi allo studio con gli agenti genotossici 4-NQO e MNNG

Il procedimento utilizzato per valutare l'attività antigenotossica dei ceppi del genere *Bacillus*, contempla una prima fase inerente la preparazione delle cellule ed una seconda fase nella quale è operato il contatto tra batteri e genotossina.

### Fase 1 - Preparazione cellule

Allestimento di colture *overnight* di ciascun ceppo in Nutrient Broth (30 mL).

Centrifugazione a 8000 rpm per 15 min con eliminazione del soprannatante.

Risospensione del pellet in 10 mL di soluzione fisiologica (lavaggio delle cellule).

Centrifugazione a 8000 rpm per 15 min con eliminazione del soprannatante.

Risospensione del pellet in 5 mL di soluzione fisiologica.

Determinazione della concentrazione cellulare.

### Fase 2 - Contatto batteri-genotossina

Aggiunta della genotossina (4-NQO o MNNG, 0.1 mM) al campione da saggiare.

Incubazione a 37 °C, per 150 min, in agitazione.

Centrifugazione a 8000 rpm per 15 min e recupero del soprannatante.

Risospensione del pellet in 5 mL di soluzione fisiologica.

Determinazione della concentrazione cellulare.

## Analisi statistica

Il confronto tra i fattori di inibizione dei controlli positivi delle genotossine e quelli determinati dopo coincubazione con i singoli ceppi, è stato effettuato mediante il test "t" di Student per confronti a coppie. Le percentuali di inibizione delle attività delle genotossine ottenute dopo coincubazione con i batteri, sono state analizzate mediante il test "t" di Student per campioni indipendenti (Motulsky 1995).

## RISULTATI

### Conte cellulari

Valutando la vitalità cellulare espressa come conta prima e dopo il contatto con 4-NQO e con MNNG, si è osservato che quasi tutti i ceppi considerati hanno mantenuto un elevato grado di vitalità dopo il contatto (Figura 1). In particolare, *Bacillus subtilis* 549 ha mantenuto invariata la vitalità dopo il contatto con entrambe le genotossine, mentre la vitalità di *Bacillus clausii* 8716 e *Bacillus subtilis* 779 era influenzata da MNNG, ma non da 4-NQO. Si deduce che le differenze nel comportamento dei ceppi sono del tutto casuali e non sono riferibili alla specie di appartenenza.

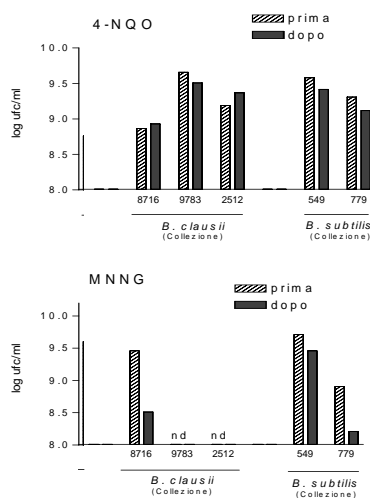


Figura 1. Vitalità dei ceppi batterici prima e dopo esposizione a 4-NQO e MNNG.

### Inibizione della genotossicità di 4-NQO e di MNNG

Tutti i ceppi considerati erano in grado di inibire l'attività biologica delle genotossine. In particolare, tutti i ceppi considerati erano in grado di inibire in modo significativo ( $p < 0.01$ ) l'attività biologica di 4-NQO. Dopo coincubazione con i batteri i valori di  $IF$  sono risultati sempre inferiori a 2 (linea tratteggiata), che rappresenta il valore critico per l'individuazione di effetti genotossici con il metodo SOS-Chromotest (Figura 2).

Il comportamento riscontrato in *Bacillus clausii* risultava del tutto sovrapponibile a quello osservato in ceppi della specie *Bacillus subtilis* (Figura 2).

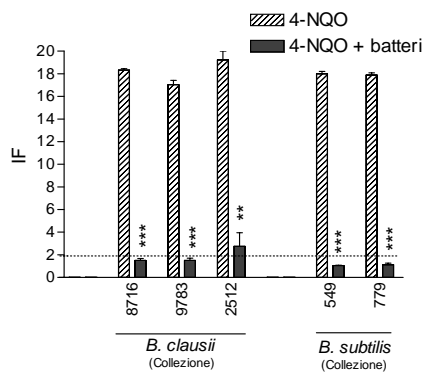


Figura 2. Attività antigenotossica di 4-NQO.

Una notevole riduzione dei fattori di induzione di genotossicità era stata osservata anche dopo coincubazione dei ceppi batterici saggiati con la genotossina MNNG, che risultavano sempre inferiori al valore critico di 2 (linea tratteggiata). Va rilevato però che in questo caso i livelli di significatività riscontrati tra  $IF_C +$  e  $IF_{\text{coincubazione}}$  erano estremamente variabili:  $p < 0.001$  per *Bacillus clausii* 8716 e *Bacillus subtilis* 549; ns per *Bacillus subtilis* 779 (Figura 3).

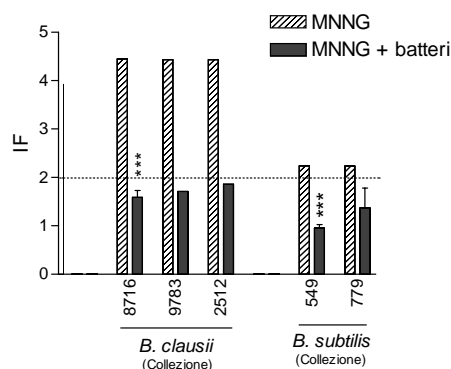


Figura 3. Attività antigenotossica di MNNG.

## CONCLUSIONI

I dati sul ruolo inibitorio dei ceppi di *B. clausii* e *B. subtilis* nei confronti delle genotossine 4-NQO e MNNG ottenuti nel presente studio permettono di sottolineare quanto segue che tutti i ceppi considerati, indipendentemente dalla specie di appartenenza, sono risultati capaci di operare una forte inibizione della genotossicità del nitroarene 4-NQO, mentre l'effetto esercitato sull'alchilante MNNG è risultato di minore entità. I ceppi caratterizzati da attività antigenotossica, rivelata nel saggio SOS-Chromotest, hanno mantenuto un elevato grado di vitalità dopo il contatto con le genotossine.

## BIBLIOGRAFIA

1. Brady L.J., Gallaher D.D., Busta F.F. -The role of probiotic cultures in the prevention of colon cancer. *J. Nutr.* 130: S410-S414, 2000
2. Cenci G., Caldini G., Mastrandrea V., Votoni M.R. - Carbohydrate enriched diet and bacterial glycosidases in rat faeces. *Microbios.* 76: 143-151, 1993a

3. Cenci G., Caldini G., Votoni M.R. - Relationships between carbohydrate medium composition and  $\beta$ -glucuronidase expression in *Escherichia coli*. *Biomedical Letters.* 48 : 7-13, 1993b
4. Cenci G. - Antigenotoxicity: a new tool for probiotics. In CD Proceedings of 2<sup>nd</sup> Probiotics, Prebiotics & New Foods, pp. 12-14, Rome, September 7-9, 2003
5. Fuller R. - Probiotics in man and animals. *J. Appl. Bacteriol.* 66: 365-378, 1989
6. Guarner F., Malagelada J.R. - Gut flora in health and disease. Review. *Lancet.* 361:512-519, 2003
7. Hirayama K., Rafter J.-The role of probiotic bacteria in cancer prevention. *Microb. Infect.* 2: 681-686, 2000
8. Holzapfel W.H., Haberer P., Suel J., Schillinger U., Huis in't Veld J.H.J. - Overview of gut flora and probiotics. *Int. J. Food. Microbiol.* 41: 85-101, 1998
9. Lo P.R., Yu R.C., Chou C.C., Tsai Y.H. - Antimutagenic activity of several probiotic bifidobacteria against benzo[a]pyrene. *J. Biosc. Bioeng.* 94: 148-153, 2002
10. Matsushima T., Sugimura T. Metabolism - Recent results in cancer research. Chemistry and biological action of 4-nitroquinoline-N-oxide. (H. Endo T. Ono and T. Sugimura Ed.), pp 53-60. Springer-Verlag, Berlin, 1971
11. Miller, J.H. Assay of  $\beta$ -galactosidase. - Experiments in molecular genetics. (Miller J. H. Ed.), pp 352-355. Cold Spring Harbor, New York, 1972
12. Motulsky, H. - Intuitive Biostatistics. Oxford University Press, New York 1995
13. Nadathur, S.R., Gould S.J. and Bakalinsky A.T. - Antimutagenicity of fermented milk. *J. Dairy Sci.* 77: 3287-3295, 1994
14. Nagao, T., Sugimura T. - Molecular biology of the carcinogen 4-Nitroquinoline- 1-oxide. *Adv Cancer Res.* 23:131-169, 1976
15. Quillardet P., Hofnung M. - The SOS chromotest, a colorimetric bacterial assay for genotoxins: procedures. *Mutat. Res.* 147: 65-78, 1985
16. Rolfe R.D. - The role of probiotic cultures in the control of gastrointestinal health. *J. Nutr.* 130: 396S-402S, 2000
17. Saarela M., Mogensen G., Fondén R., Mättö J., Mattila - Sandholm T. - Probiotic bacteria: safety, functional and technological properties. Review article. *J. Biotechnol.* 84: 197-215, 2000
18. Vaughan E.E., Mollet B., De Vos W.M. - Functionality of probiotics and intestinal lactobacilli: light in the intestinal tract tunnel. *Current opinion in Biotechnology.* 10: 505-510, 1999
19. Vorobjeva L.I., Abilev S.K. - Antimutagenic Properties of Bacteria: Review. *Appl. Biochem. Microbiol.* 38 (2): 97-107, 2002

**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 GTR 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 bielorusi provenienti dall’area di Chernobyl, mediante esami ecografici, dosaggi ematici, misure antropomorfe, 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<sub>2</sub> 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 qualità 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*



## INDICE AUTORI

### A

Alagna A. ....p. 21  
Albertini M. ....p. 83  
Alitto G. ....p. 217, 359  
Alvaro A. ....p. 141  
Amantini M. ....p. 77, 293, 379  
Ambrosini D. ....p. 353  
Amelio C. ....p. 35  
Andriola L. ....p. 113  
Angelucci M. ....p. 123, 133  
Anile F. ....p. 217, 359  
Arca S. ....p. 293  
Arcioni L. ....p. 269  
Arpino G. ....p. 53  
Asdrubali F. ....p. 133,181

### B

Balzano M. ....p. 15,169  
Barbanera M. ....p. 57  
Barbaro S. ....p. 9  
Barrera G. ....p. 9  
Baudà A. ....p. 147  
Bellabarba G. ....p. 123  
Bilotti F. ....p. 3  
Bistoni F. ....p. 47  
Bongioannini Cerlini P. ....p. 71  
Borelli D. ....p. 147  
Bracco S. ....p. 281  
Brambilla G. ....p. 165  
Brunori V. ....p. 379  
Buratti C. ....p. 209

### C

Cannistraro G. ....p. 91, 321  
Cardinale N. ....p. 53  
Carletti C. ....p. 197  
Carlini M. ....p. 41  
Castagnella A. R. ....p. 175  
Castellucci S. ....p. 41  
Cavalaglio G. ....p. 57, 63  
Cenci E. ....p. 47  
Ciccarella G. ....p. 335  
Cipollone R. ....p. 329  
Cipriani F. ....p. 259  
Cocchi S. ....p. 269  
Collalto L. ....p. 353  
Conte A. ....p. 15,169  
Coppi M. ....p. 127  
Corsi N. ....p. 35, 47  
Cotana F. ....p. 77, 293, 379  
Cotana S. ....p. 57  
Crosa G. ....p. 29  
Curcuruto S. ....p. 123

### D

D'Alessandro F. ....p. 181  
Danielis R. ....p. 367, 373  
de Lieto Vollarò R. ....p. 253  
Dell'Isola M. ....p. 97  
Desideri U. ....p. 269, 275  
Di Girolamo E. ....p. 97  
Di Profio P. ....p. 293  
Di Rosa P. ....p. 3  
D'Orso A. ....p. 227  
Durvilli I. ....p. 233

### E

Elisei F. ....p. 301

### F

Fabbri K. ....p. 233  
Fantozzi F. ....p. 239, 245  
Ferrante A. ....p. 287  
Filippeschi S. ....p. 245  
Filipponi M. ....p. 35  
Foglia E. ....p. 329  
Forni A. ....p. 97  
Franco A. ....p. 239  
Frattolillo A. ....p. 97  
Frenquellucci F. ....p. 97  
Frezzi L. ....p. 133

### G

Galli G. ....p. 259, 353  
Gatta V. ....p. 367, 373  
Gentili P. L. ....p. 301  
Germani R. ....p. 293  
Germanò D. ....p. 91  
Giannetti L. ....p. 263  
Giraldi D. ....p. 57, 63  
Girdinio P. ....p. 107  
Giuffrè M. R. ....p. 175  
Giuliobello M. ....p. 35, 47  
Gonfia F. ....p. 395  
Grippaldi V. ....p. 309  
Guattari G. ....p. 3

### I

Ippolito R. ....p. 315

### L

Laforgia D. ....p. 335  
La Gennusa M. ....p. 203, 227  
Leonardi D. ....p. 269  
Lisiero A. ....p. 141  
Lubiano M. ....p. 29

Luciani R. ....p. 113  
Lunghi P. ....p. 275

## M

Maffei L. ....p. 165  
Magrini A. ....p. 83  
Mancini A. ....p. 275  
Mangia C. ....p. 335  
Marchetti G. ....p. 133  
Marcucci E. ....p. 367, 373  
Marino C. ....p. 203  
Marinoni A. ....p. 147  
Marletto G. ....p. 387  
Marri A. ....p. 379  
Martino E. ....p. 107  
Massimo D. E. ....p. 175  
Massoli S. ....p. 63  
Mencacci A. ....p. 47  
Milanese M. ....p. 335  
Milone A. ....p. 189, 223  
Milone D. ....p. 189, 223  
Moncada Lo Giudice G. ....p. 127  
Montecarlo I. ....p. 47  
Moroni B. ....p. 343, 349

## N

Nicoletti G. ....p. 217, 359  
Ninni R. ....p. 287  
Nucara A. ....p. 203

## O

Olivetti I. ....p. 97  
Ortica F. ....p. 301  
Ortica S. ....p. 161

## P

Paglione G. ....p. 367, 373  
Pietrafesa M. ....p. 203  
Pini Prato A. ....p. 107  
Pitruzzella S. ....p. 189, 223  
Pitzurra L. ....p. 343  
Ponterio L. ....p. 91, 321  
Prignani P. ....p. 155  
Proietti S. ....p. 275  
Pudano A. ....p. 203

## R

Raffellini G. ....p. 263  
Ricciardi P. ....p. 209  
Rizzo G. ....p. 227

Rossi F. ....p. 35, 47, 77, 293, 301, 379  
Ruggiero F. ....p. 53

## S

Salierno C. ....p. 315  
Sansone Santamaria A. ....p. 9  
Santini T. ....p. 245  
Sapia C. ....p. 3  
Savelli G. ....p. 293  
Scaccianoce G. ....p. 227  
Scampitelli M. ....p. 321  
Schenone C. ....p. 147  
Schipa I. ....p. 335  
Sciurpi F. ....p. 197  
Servili S. ....p. 63  
Sfarra S. ....p. 353  
Silvaggio R. ....p. 123  
Sorbi N. ....p. 269  
Strada M. ....p. 141  
Stragapede F. ....p. 15

## T

Tanzarella A. ....p. 335  
Tarabusi V. ....p. 233  
Terzoni P. ....p. 275  
Tibone C. ....p. 123  
Tombolillo N. ....p. 123  
Toscano A. ....p. 3  
Tosti C. ....p. 161  
Traverso F. ....p. 29  
Tronchin L. ....p. 233  
Trucco A. ....p. 29, 281

## U

Urbani M. ....p. 301

## V

Vallati A. ....p. 253  
Valle M. ....p. 15  
Vegni L. ....p. 3  
Venditti A. ....p. 127, 155  
Vergoni M. ....p. 209  
Vernaci A. R. ....p. 309  
Vescio M. ....p. 175

## Z

Zamagni A. ....p. 113  
Zambon G. ....p. 165  
Zepparelli F. ....p. 269



