



CONDIZIONAMENTO DELL'ARIA
RISCALDAMENTO
REFRIGERAZIONE

Ventilazione e benessere ambientale negli edifici in regime estivo

G. Cammarata, L. Marletta

1. INTRODUZIONE

Mentre ampiamente documentato in letteratura è il rapporto tra aspetti energetici e ventilazione [1,2,3], poco indagato è il legame tra quest'ultima e il benessere ambientale.

Riferimenti a questo tema si trovano in Olgay [4], Fanger [5] e Givoni [6], ma sempre limitatamente a correlazioni tra benessere, temperatura interna e velocità dell'aria in ambiente.

È allora opportuno indagare sulle correlazioni tra le grandezze del benessere ed i parametri strutturali del sistema edificio - quali geometria, materiali, vetrate, composizione delle pareti ecc. - al fine di fornire uno strumento di ottimizzazione progettuale.

Una tale indagine può essere condotta attraverso un'ampia sperimentazione ovvero - e comunque in via preliminare - con l'ausilio di uno strumento integrato di progettazione, capace di documentare, ad un tempo, gli aspetti energetici e quelli legati al benessere.

A questo scopo è stato utilizzato il codice DPM [7], sviluppato nell'ambito del PFE-2 per il calcolo del transitorio termico degli edifici, recentemente sottoposto a validazione sperimentale [11] ed - allo scopo - dotato di algoritmi per la valutazione del benessere ambientale.

2. ENERGETICA DELL'EDIFICIO, VENTILAZIONE E BENESSERE AMBIENTALE

Com'è noto la sensazione del benessere termico dipende da innumerevoli fattori quali: temperatu-

ra dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria, umidità relativa, resistenza del vestiario e attività fisica svolta dai soggetti. Tra questi la temperatura al bulbo secco (T_a) è certo la più significativa e la sua correlazione con il benessere è forse la più studiata.

Eccetto che per gli ambienti termostattizzati, la T_a è una grandezza oscillante in quanto condizionata dalla forzante esterna dell'edificio che è di natura periodica (temperatura esterna, radiazione solare). È pertanto non corretto classificare un locale confortevole solo quando la sua T_a media (per date condizioni al contorno) è quella di benessere, dal momento che le fluttuazioni orarie, attorno a questo valore, possono eccedere anche di molto i limiti del benessere.

Com'è noto l'ampiezza delle oscillazioni dipende in maniera sostanziale dalla struttura del locale e cioè dai suoi parametri geometrici e termofisici.

Tra questi, e a parità di altre condizioni, particolare rilievo ha la composizione delle pareti, vale a dire non solo il tipo e lo spessore dei materiali ma anche la disposizione degli strati. Tale influenza sulla risposta termica dell'ambiente è stata documentata in altra sede [7,8].

Qui è solo il caso di richiamare che la posizione del materiale di maggiore resistenza termica (ad esempio l'isolante) in prossimità della faccia interna della parete, tende nettamente ad escludere la massa muraria dalla vicenda di accumulo e rilascio del calore in ambiente. Si osserva così che locali con pareti rivestite all'interno di materiale isolante presentano delle fluttuazioni di temperatura interna più ampie di ambienti con pareti isolate esternamente.

In questo caso il contributo di calore che perviene all'ambiente non viene assorbito dalla massa strutturale ma si riversa sull'aria elevandone la temperatura. Ciò determina il riscaldamento degli strati superficiali delle pareti e quindi l'innalzamento della temperatura media radiante rispetto a quella ambiente.

Ciò si verifica indipendentemente dai materiali usati e tanto più sensibilmente quanto più intensa è la sorgente interna di calore (per esempio radiazione solare ammessa attraverso le vetrate).

Ebbene, in un ambiente ventilato, la correlazione tra la portata d'aria e gli altri parametri progettuali o termofisici (temperatura ambiente, temperatura media radiante, tipo delle pareti, superficie vetrata ecc.) è estremamente complessa per l'intrecciarsi di effetti radiativi, convettivi e di accumulo del calore nelle masse strutturali. Una tale indagine non può che eseguirsi attraverso appropriati modelli fisici e strumenti di calcolo. Alcuni di questi verranno introdotti nel paragrafo successivo.

Qui ci limitiamo a segnalare che la ventilazione può essere classificata come naturale o forzata; diurna o notturna; a temperatura imposta (impianto di condizionamento) o variabile (per esempio ventilazione con temperatura esterna nei periodi in cui questa si mantiene inferiore alla T_a).

La ventilazione naturale in regime estivo è quasi esclusivamente di tipo notturno poiché, in generale, solo di notte la temperatura esterna è inferiore a quella ambiente e quindi adatta allo scopo. È particolarmente indicata nei paesi con clima caldo secco e comunque laddove si usufruisce di un forte abbassamento notturno della temperatura esterna (l'entità di questa escursione termica è invece notevolmente inferiore nei paesi tropicali a clima caldo umido) [4,6].

Per quanto attraente dal punto di vista dell'utilizzo di risorse naturali e del risparmio energetico, tale soluzione riscontra forti limitazioni in aspetti connessi con la sicurezza e la privacy (che impongono la chiusura di finestre e balconi) ovvero connessi con la stessa velocità dell'aria che può dar luogo a correnti fastidiose, capaci di interferire con la salute e col sonno.

La ventilazione forzata non presenta alcuno di questi inconvenienti. In particolare l'impianto di distribuzione dell'aria può essere progettato in

maniera tale da assicurare condizioni di aria quasi stagna in ogni punto del locale (velocità minori di 0,1 m/s).

L'aria di immissione può poi provenire da un impianto di climatizzazione (e quindi a temperatura e portata imposte) oppure dall'ambiente esterno (portata imposta ma temperatura variabile). Anche questi regimi di funzionamento influenzano direttamente il benessere.

Scopo della presente indagine è duplice: 1) ricercare una correlazione tra portata e periodi di ventilazione, tipologia dell'ambiente e benessere termico; 2) accertare quale dei regimi di ventilazione (diurno o notturno) è preferibile dal punto di vista del benessere, con particolare riguardo alla ventilazione o condizionamento in orari notturni, che potrebbero risultare economicamente interessanti in vista di una possibile differenziazione delle tariffe orarie dell'energia elettrica.

3. I PARAMETRI DEL BENESSERE

Per caratterizzare in maniera univoca e con un unico parametro la sensazione del benessere è stata utilizzata la temperatura uniforme equivalente (T_{eu}).

Questa grandezza è stata introdotta da W.O. Wray [9] per quantificare il benessere di ambienti che presentino delle dissimmetrie termiche, ma il cui uso in situazioni più generali è stato ormai largamente accettato.

Essa è definita come la temperatura uniforme di un locale fittizio (cioè di un locale senza dissimmetrie termiche) dove il soggetto proverebbe la stessa sensazione di benessere dell'ambiente in esame.

Operativamente è definita dalla relazione:

$$T_{eu}(\tau) = \left(\frac{1}{1-s} \right) T_{mr}(\tau) + \left(\frac{s}{s-1} \right) T_a(\tau)$$

dove "s" è un parametro (*slope*) calcolabile dall'equazione di Fanger, sotto la condizione che il *Thermal load* (cioè l'accumulo di calore nel corpo umano) sia zero; ciò corrisponde alla condizione di perfetto equilibrio termico tra il corpo umano e l'ambiente circostante, e quindi di benessere per definizione.

La T_{mr} è la temperatura media radiante e calcolabile con una relazione semplificata del tipo:

$$T_{mr} = \frac{\sum_p T_p S_p}{\sum_p S_p} \quad (1)$$

in cui p è un pedice riferito alla parete; S ne è la sua superficie e T la temperatura.

I limiti di applicabilità della (1) sono discussi in [5]. Qui basti ricordare che tale correlazione è affidabile per locali che non presentino gravi dissimmetrie termiche. Tali sono appunto gli ambienti considerati in questo studio.

Viene definito "range del benessere" l'intervallo di temperatura ΔT ottenuto imponendo che il Voto Medio Previsto (PMV) assuma il valore $PMV = -1$ e $PMV = +1$. Ciò equivale, nella scala delle sensazioni del Fanger, rispettivamente al "leggermente fresco" e "leggermente caldo".

La T_{eu} consente allora di determinare agevolmente l'intervallo temporale del benessere: questo è limitato al tempo in cui la T_{eu} si mantiene all'interno del ΔT . Previo dunque il calcolo del transitorio termico del locale, e cioè note la $T_a(\tau)$ e $T_{mr}(\tau)$, questo metodo permette la valutazione del livello istantaneo di benessere attraverso il calcolo della T_{eu} .

Ciò può essere risolutivo in fase di verifica di un ambiente; mentre in fase di progettazione sarebbe più utile disporre di un unico indice numerico che consenta di stabilire rapidi confronti tra più soluzioni alternative.

A questo scopo - e con riferimento alla figura 1 - è opportuno definire un indice di discomfort "i" come l'area compresa tra la T_{eu} e l'estremo superiore ("i⁺") o inferiore ("i⁻") della fascia di benessere.

Pertanto:

$$i^+ = \int [T_{eu}(\tau) - (T_u + \Delta T)] d\tau \quad \text{se } T_{eu} > T_u + \Delta T$$

$$i^- = \int [T_{eu}(\tau) - (T_u - \Delta T)] d\tau \quad \text{se } T_{eu} < T_u - \Delta T$$

Qui T_u è la "temperatura uniforme" ottenuta ancora dall'equazione di Fanger sotto la condizione:

$$T_a = T_{mr} = T_u$$

Le grandezze s , T_u e ΔT sono tutte correlate alla resistenza del vestiario, all'attività fisica svolta dal soggetto ed all'umidità relativa (la velocità dell'aria è sempre supposta minore di 1 m/s) e dei quali W.O. Wray fornisce le rispettive correlazioni in forma di diagrammi.

In conclusione, l'indice di discomfort, come del resto suggerito dalle sue dimensioni ($^{\circ}\text{C h}$),

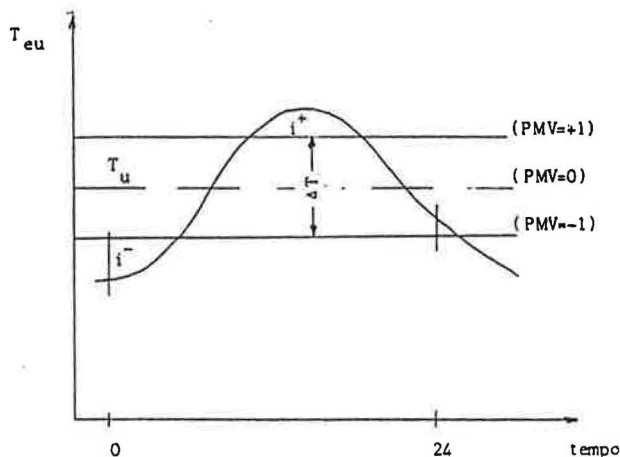


FIGURA 1

esprime, in entità e durata, lo scostamento delle condizioni ambiente dalla situazione di benessere [10].

4. IL CODICE DPM E IL MODULO AMBIENTE

Le simulazioni sono state eseguite con il codice DPM [7,11] che consente in particolare il calcolo delle temperature superficiali interne delle pareti e, da queste, la temperatura media radiante secondo l'espressione (1), nonché - com'è ovvio - la temperatura interna dell'aria.

È stato quindi valutato il transitorio, calcolate le T_{eu} e gli indici di discomfort. Si sono ipotizzati due regimi di ventilazione (diurna e notturna) con portata d'aria pari a 100, 200 e 400 m^3/h , ancora nei casi a temperatura imposta (18°C) ed a temperatura variabile (aria esterna).

Il modulo abitativo in esame è un locale di dimensioni $4 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$, con due sole pareti esterne (una a Sud ed una a Est) e dotato di finestra sul lato Sud di superficie variabile (2, 4 e 8 m^2).

Si è inoltre supposto che gli occupanti svolgano attività sedentaria (1,2 Met) ed indossino vestiario estivo (0,5 Clo).

I dati meteorologici sono quelli tipici della zona mediterranea in estate. Si suppone infine che la velocità dell'aria in ambiente si mantenga al di sotto di 0,1 m/s per qualunque portata di ventilazione.

5. RISULTATI

Nelle figure 2, 3 e 4 è mostrato l'andamento della

temperatura uniforme equivalente (T_{eu}) per i diversi tipi di parete, nel caso di ambienti non ventilati.

Al fine di apprezzare l'effetto della disposizione degli strati, sono state indagate quattro tipologie di pareti: leggera (l) - in laterizio da 1000 kg/m^3 - e pesante (p) - in cls -; coibentate alternativamente dall'esterno (e) o dall'interno (i) con poliuretano.

I grafici mostrano che il disagio termico cresce sensibilmente, in intensità e durata, al crescere della superficie vetrata. Particolarmente rilevante è il sistematico accostamento tra le curve relative a pareti isolate dall'interno (contraddistinte dall'indice "i") e la netta differenziazione di quelle relative a pareti isolate dall'esterno (indice "e").

Ciò significa che, a parità di vetratura, l'isolante in prossimità della superficie interna della parete vanifica le qualità termoaccumulatrici dei materiali strutturali e dà luogo ad una risposta termica dell'ambiente pressoché indipendente dal tipo di parete.

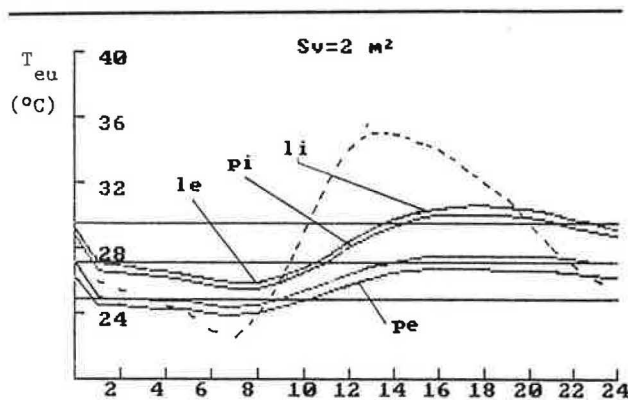


FIGURA 2

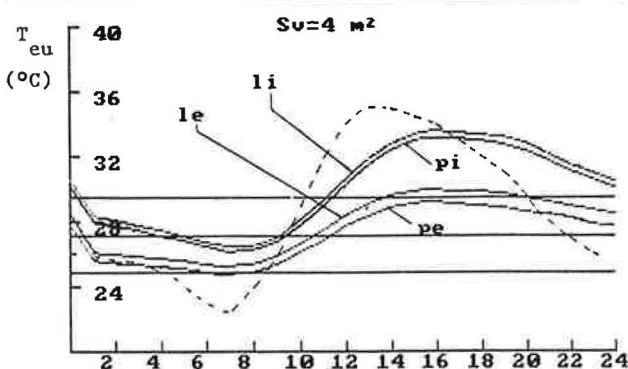


FIGURA 3

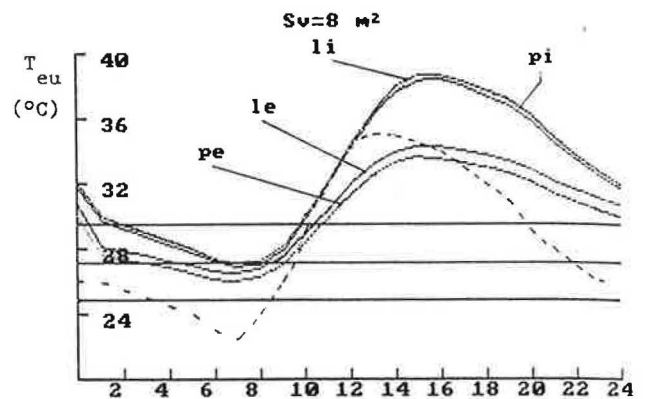


FIGURA 4

Le figure 5, 6, 7, 8, 9 e 10 mostrano invece l'effetto della portata G sulla T_{eu} . Esse sono relative al modulo con superficie vetrata pari a 4 m^2 e così ordinate:

- figure 5-6: ventilazione diurna dalle ore 10 alle 20 a temperatura di immissione $T = 18^\circ\text{C}$;
- figure 7-8: ventilazione notturna dalle ore 20 alle 10 a temperatura di immissione $T = 18^\circ\text{C}$;
- figure 9-10: ventilazione notturna con aria esterna (T_e), se $T_a(\tau) < T_e(\tau)$.

Ogni coppia di figure è relativa ai due casi estremi: parete leggera isolata dall'interno o parete pesante isolata dall'esterno, al fine di meglio evidenziarne le differenze.

Risulta in generale che la ventilazione, sia diurna che notturna, è tanto più efficace quanto più l'ambiente è caratterizzato da bassa inerzia termica. In particolare la ventilazione notturna a temperatura imposta ($T_i = 18^\circ\text{C}$, ovvero condizionamento notturno; fig. 7-8) consente sensibili ri-

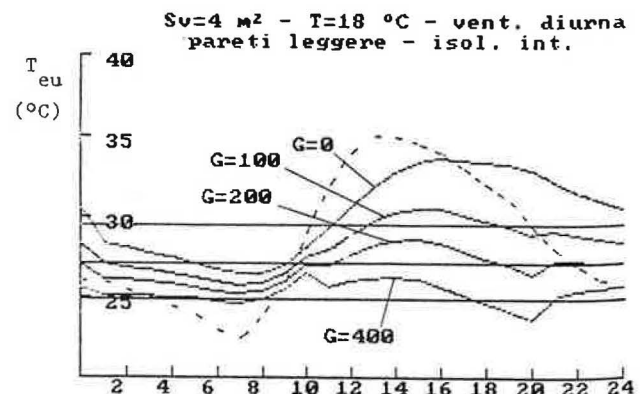


FIGURA 5

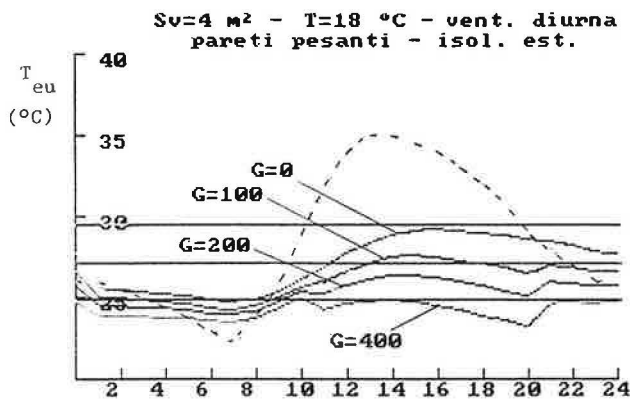


FIGURA 6

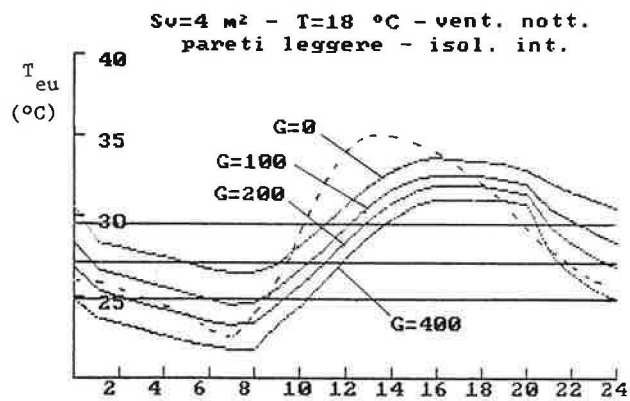


FIGURA 7

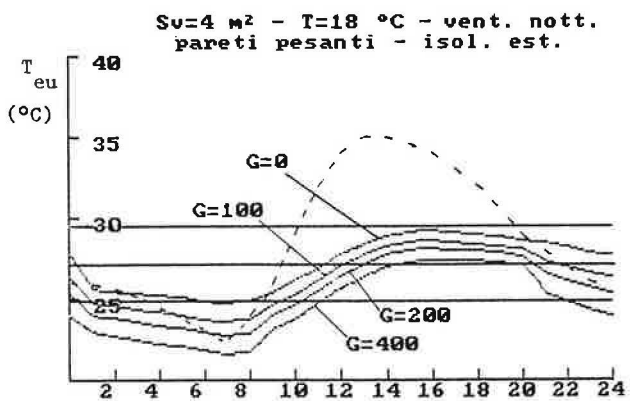


FIGURA 8

duzioni del disagio termico solo per alti valori della portata.

Tale soluzione potrebbe risultare pertanto appropriata per locali adibiti a prevalente uso diurno (uffici, banche ecc.) e di sicuro interesse economico nel caso di differenziazione oraria delle tariffe elettriche.

La ventilazione notturna a temperatura esterna procura invece lievi miglioramenti solo per ambienti termicamente poco inerti (fig. 9). Risulta comunque non risolutiva ai fini del benessere, mentre è praticamente influente nel caso di locali ad alta inerzia termica (fig. 10).

In merito poi all'indice di discomfort è da osservare che - limitatamente ai casi esaminati e come intuibile dalle precedenti figure - ambienti termicamente molto inerti garantiscono già di per sé un accettabile grado di benessere.

La ventilazione non apporta pertanto sensibili miglioramenti e l'indice di discomfort è pressoché nullo.

È invece significativo riportare questo parametro nel caso (estremo) di locali dotati di pareti leggere isolate internamente (fig. 11, 12 e 13).

Esso, a parità di ogni altra cosa, risulta decrescente con la portata di ventilazione (G) e crescente con la superficie vetrata (S_v) e, in gene-

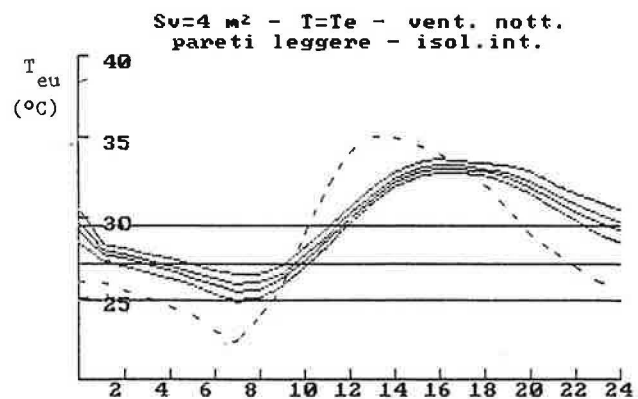


FIGURA 9

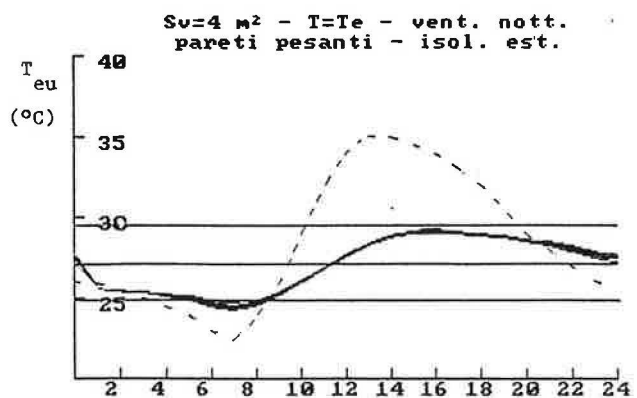


FIGURA 10

rale, più fortemente dipendente da questa che non da quella.

La dipendenza di "i" dalla superficie vetrata è ovviamente indotta dalla temperatura media radiante, a sua volta strettamente correlata con la Sv.

Viceversa la dipendenza di "i" dalla portata è meno marcata. Ciò denota che anche in regime di ventilazione il benessere ambientale è sostanzialmente condizionato dalla entità delle vetrature.

La ventilazione notturna con aria esterna ha infine debole influenza sul benessere termico (fig. 11). Non si può pertanto confidare eccessivamente sul raffreddamento naturale degli edifici, se le condizioni esterne non sono oltremodo favorevoli.

6. CONCLUSIONI

In questa nota si è indagato su alcuni effetti della ventilazione sul benessere termico.

Di notevole ausilio si è dimostrato l'indice di discomfort qui considerato come espressione sintetica del disagio termico in entità e durata.

Assumendo questo come parametro significativo del benessere, emerge il ruolo della struttura parietale, sia in termini di capacità termoaccumulatrici che di composizione stratigrafica.

In particolare è stato evidenziato il ruolo della posizione dell'isolante nella parete.

Oltre ai vantaggi di tipo energetico, s'è visto che anche il benessere beneficia dell'isolante, posto il più possibile in prossimità della superficie esterna della parete.

Inoltre, a parte l'ovvio vantaggio della ventilazione diurna a temperatura imposta (condizionamento), risulta interessante anche la ventilazione notturna (preraffreddamento), soprattutto nel caso di ambienti utilizzati nella prima parte del giorno (uffici, banche ecc.) e possibilmente concomitante a una differenziazione oraria delle tariffe elettriche.

Da ultimo la ventilazione notturna con aria esterna è solo praticabile per edifici siti in zone climatiche con adeguate escursioni giornaliere della temperatura. Essa risulta però particolarmente efficace per locali di bassa inerzia termica.

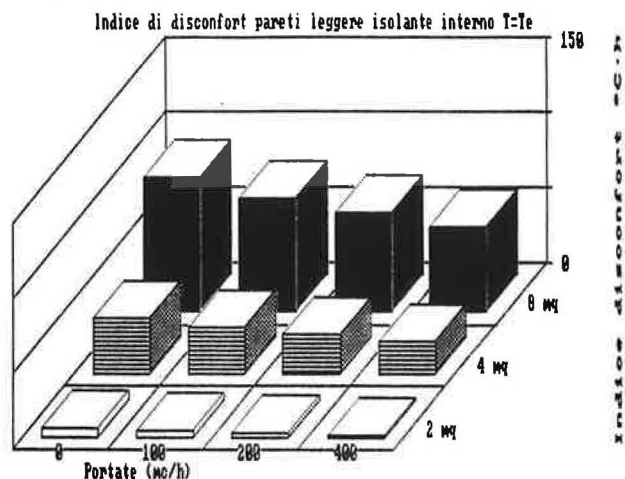


FIGURA 11

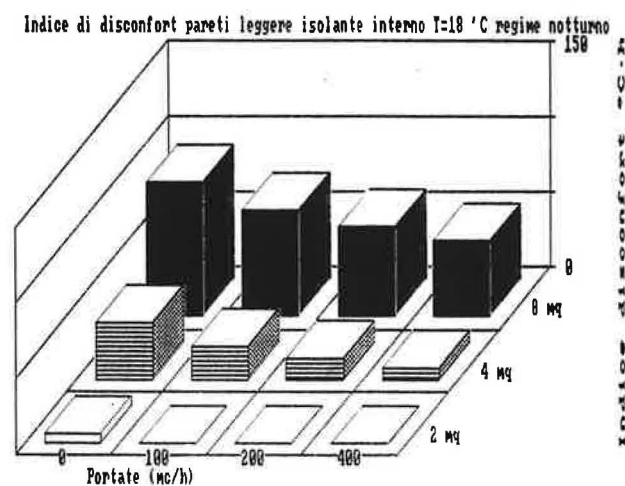


FIGURA 12

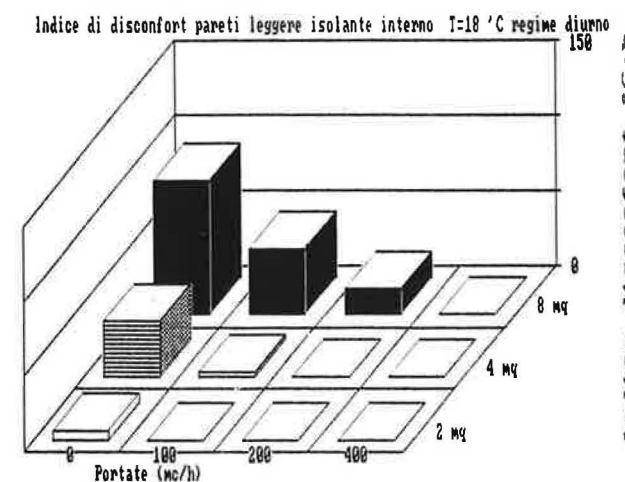


FIGURA 13

Bibliografia

- [1] Jackman, Tech: "A study of the natural ventilation of tall office buildings", J.I.H.H.E., Vol. 38, 1970
- [2] AA.VV.: "Mathematical models of air infiltration: A brief review and bibliography". Air infiltration Center, 1982
- [3] Agnoletto, Grava: "La ventilazione naturale degli ambienti", CNR, PFE, 1982
- [4] Olgyay: "Progettare con il clima": Muzzio 1978
- [5] Fanger: Thermal Comfort, Mc Graw Hill, 1972
- [6] Givoni: Man Climate and Architecture, Elsevier 1977
- [7] Cammarata, Marletta: "Il DPM: un codice di calcolo multiroom a parametri distribuiti", Atti del Congresso Naz. ATI 87, Genova 1987.
- [8] Cammarata, Marletta: "Analisi termica delle pareti composte con il metodo delle traiettorie di stato, confronti con la soluzione esatta", Atti del Congr. ATI 87, Genova, settembre 1987
- [9] Wray: "A simple procedure for assessing thermal comfort in passive solar buildings, Solar Energy", 1980, Vol. 25
- [10] Butera, et al.: "Il comfort termico come parametro guida per il dimensionamento dei componenti passivi", CNR-PFE2, 1985
- [11] Aleo, Antinucci, Cammarata, Marletta: "Validazione sperimentale del codice DPM"; Atti del Congr. Naz. ATI 89, Co-senza, settembre 1989.



Giuliano Cammarata

Ha svolto la sua attività scientifica e didattica presso l'Università di Catania a partire dall'A.A. 1971-72. Attualmente ricopre il ruolo di professore associato di Fisica Tecnica presso l'Istituto di Macchine della Facoltà di Ingegneria di Catania. I settori nei quali ha maggiormente sviluppato la sua indagine scientifica sono la modellistica matematica per la simulazione dei trasduttori termici nei sistemi solari attivi e passivi, la formulazione di codici di calcolo per la previsione delle prestazioni energetiche degli edifici (nell'ambito del PFE 2), misure sperimentali di inquinamento da rumore urbano e di danno da rumore sugli operatori di mezzi meccanici e il controllo dei sistemi solari mediante microprocessore. La sua attività scientifica è documentata in oltre settanta lavori a stampa.



Luigi Marletta

Ha operato presso l'Istituto di Macchine dell'Università di Catania sin dall'A.A. 1979-80. Nel 1983 è risultato vincitore del concorso libero per ricercatore universitario e dall'A.A. 1986-87 è professore associato di Fisica Tecnica presso la facoltà di Ingegneria di Catania dove attualmente insegna Impianti Termotecnici. La sua attività scientifica è stata prevalentemente centrata sui temi dell'energetica degli edifici e dei sistemi ad energia solare (sistemi attivi e passivi) per i quali, in collaborazione col prof. Cammarata, ha sviluppato i modelli matematici del transitorio termico. Ha studiato la statistica dei dati di radiazione solare nel territorio etneo ed elaborato modelli di previsione con metodi stocastici. Ha eseguito campagne di misure per la valutazione dell'inquinamento acustico nei centri urbani e di danno da rumore sugli operatori di macchine agricole e industriali. Coltiva gli studi sull'analisi dei sistemi alla luce del secondo principio e sulla termodinamica dell'irreversibile. È autore di oltre quaranta lavori a stampa.