

# La distribuzione spaziale delle situazioni stazionarie di benessere termico globale negli ambienti moderati

G. Franzitta, A. D'Orso, S. Trapani, G. Rizzo

## 1. INTRODUZIONE

Già da qualche decennio gli studi concernenti il benessere termoigometrico nei climi artificiali vengono condotti con assiduità da vari gruppi di ricerca in tutto il mondo.

Anche in Italia si registra un risveglio di interesse da parte dei ricercatori e, in generale, degli operatori del settore edilizio: ne è prova il successo riscosso da una serie di seminari di studio recentemente organizzati dall'A.I.CARR e dalla RE-HVA.

Ciò è estremamente significativo perché il benessere termico costituisce una delle prestazioni principali, certamente tra le più direttamente avvertibili, che un edificio rende ai suoi occupanti.

L'obiettivo del raggiungimento di un accettabile livello delle sensazioni termiche all'interno di un edificio dovrebbe ovviamente essere preso in considerazione fin dalla fase progettuale.

Ma, affinché le analisi concernenti il benessere termoigometrico entrino a far parte del bagaglio culturale dei progettisti ed assumano finalmente pari dignità rispetto alle analisi economiche, strutturali, architettoniche e termo-energetiche che vengono tradizionalmente eseguite, risulta basilare la possibilità di disporre di metodi automatici, o comunque di facile impiego, per la valutazione delle condizioni di benessere (o males-

sere) termico che si instaurano in un ambiente in virtù delle diverse scelte progettuali adottate.

Tali metodi, inoltre, dovrebbero essere sufficientemente flessibili da consentire l'esecuzione di analisi delle condizioni di benessere in ogni punto dell'ambiente in esame.

È noto infatti che la sensazione di benessere (o di disagio) termoigometrico è fortemente dipendente dalla dislocazione spaziale del soggetto; le sue sollecitazioni fisiologiche variano infatti in maniera considerevole in virtù delle diverse distribuzioni di temperatura che si determinano sulle superfici che delimitano l'ambiente in cui egli si trova ad operare.

In ciascun punto della stanza, nel quale è ipotizzato trovarsi un soggetto, possono infatti concorrere flussi radiativi dovuti alle pareti circostanti, a sorgenti artificiali (lampade, pannelli radianti ecc.) ed alla fonte solare. Tali contributi termici possono modificare le condizioni di benessere in modo drastico; ugualmente succede in presenza di flussi convettivi dovuti a correnti d'aria locali, prodotte dai diffusori degli impianti di climatizzazione.

Specialmente negli edifici adibiti ad usi commerciali o per la produzione di servizi, nei quali le persone conservano generalmente per un lungo periodo di tempo la medesima dislocazione, questi contributi termici "localizzati" vanno accuratamente computati, sia ai fini della definizione delle zone effettivamente utilizzabili di un ambiente, sia, in sede di progettazione, per un più corretto dimensionamento degli impianti, delle superfici trasparenti di confine, o per l'ottimizzazione dei layout interni.

Prof. ing. Guglielmo Franzitta, dott. ing. Antonino D'Orso, dott. ing. Sebastiano Trapani, Dipartimento di Energetica ed Applicazioni di Fisica, Università di Palermo

Prof. ing. Gianfranco Rizzo, Istituto di Ingegneria Civile ed Energetica, Facoltà di Ingegneria, Università di Reggio Calabria

Purtroppo le valutazioni puntuali del benessere termico in un ambiente confinato sono in genere difficilmente ottenibili, a causa della scarsa disponibilità di algoritmi che consentano di valutare in modo rapido e diretto i fattori di vista tra il soggetto e le superfici dell'involucro.

Con questo articolo ci proponiamo di fornire dei semplici algoritmi per il calcolo automatico delle condizioni di benessere, qui individuate dal "Voto Medio Previsto" (PMV), in funzione della dislocazione spaziale del soggetto.

Tali algoritmi sono ricavati, con un semplice procedimento di regressione, dai grafici proposti da Fanger, e forniscono il fattore di vista fra corpo umano ed una qualunque delle superfici che costituiscono l'involucro (ipotizzato parallelepipedo) che lo contiene.

Il loro impiego si presenta molto agevole, richiedendo soltanto la individuazione di alcune dimensioni lineari, caratteristiche della posizione del soggetto nell'ambiente considerato.

A tal proposito si ricorda che di recente è stato proposto un elegante metodo [10] per la individuazione dei fattori di forma fra corpo umano e ambiente circostante, che richiede però la conoscenza di alcuni parametri angolari, in genere di più difficile rilevazione.

Gli algoritmi qui presentati, inoltre, essendo stati costruiti a partire dai dati sperimentali di Fanger, non necessitano di ipotesi semplificative sulla forma dei soggetti umani, che possono venire qui considerati nelle posture eretta e seduta.

## 2. BENESSERE TERMICO IN REGIME STAZIONARIO

Sostanzialmente i modelli matematici oggi largamente più diffusi per la previsione delle sensazioni di benessere termico per gli occupanti di ambienti termicamente moderati possono essere classificati sotto tre grandi gruppi, corrispondenti ai principali filoni di ricerca tuttora attivi:

- il modello di Fanger [1, 2];
- il modello a due nodi del Pierce Foundation Laboratory [3];
- il modello a due nodi della Kansas State University [4, 5].

Molti confronti sono stati proposti in letteratura tra questi metodi: tali comparazioni non saranno qui ricordate perché esulano dagli scopi di questo articolo: si rimanda comunque, in particolare, eccellenti trattazioni reperibili in [6, 7].

Nel presente studio, in virtù del fatto che si ci riferirà ad analisi riguardanti gli ambienti termicamente moderati (nei quali cioè è presumibile che si possano instaurare le condizioni di benessere termico), ci si muoverà nell'ambito della teoria e delle ipotesi di Fanger che, nelle condizioni appena citate, conservano una certa supremazia sugli altri metodi, oltre che un'indubbia facilità di impiego.

Questa scelta è suffragata dal fatto che una recente proposta di norma dell'UNI ha sostanzialmente fatto propria la teoria di P.O. Fanger per la valutazione delle condizioni di benessere termico negli ambienti moderati [8].

### 2.1. Variabilità spaziale dei termini dell'equazione del bilancio

Secondo la teoria di P.O. Fanger, il bilancio energetico su un soggetto che è ipotizzato trovarsi in condizioni stazionarie, che sta sostenendo un dato livello di attività, e caratterizzato da valori costanti (e relativi alla situazione di benessere) della temperatura media cutanea e della secrezione di sudore, è dato dalla somma algebrica di tutti i contributi termici che afferiscono al corpo umano o che da esso sono generati ed emessi verso l'ambiente circostante:

$$M = W + E_d + E_{sw} + E_{re} + E_{dr} + R + C \quad (1)$$

dove  $M$  è il metabolismo energetico del corpo umano;  $W$  è la potenza meccanica scambiata dal corpo umano con l'ambiente circostante;  $E_d$  è la potenza termica attribuibile al vapor d'acqua che diffonde attraverso la pelle;  $E_{sw}$  è la potenza termica connessa all'evaporazione delle secrezioni cutanee;  $E_{re}$  e  $E_{dr}$  sono le potenze termiche disperse dal corpo umano durante la respirazione rispettivamente come calore latente e come calore sensibile;  $R$  e  $C$  sono le potenze termiche attribuibili ai fenomeni radiativi e convettivi che si innescano con l'ambiente circostante.

La variabilità spaziale di tali termini, laddove si ipotizzi un ambiente caratterizzato da isotropia della temperatura, dell'umidità relativa e della velocità dell'aria, è sostanzialmente imputabile alla variazione dell'ammontare delle superfici circostanti realmente "viste" dal soggetto, quando questi muta la sua posizione rispetto agli elementi dell'involucro che lo circonda: poiché tali elementi di confine non sono in genere caratterizzati dallo stesso valore di temperatura superficiale, essi contribuiscono in maniera differente

allo scambio radiativo complessivo tra soggetto ed involucro.

Il termine  $R$ , responsabile dello scambio termico radiativo tra soggetto ed ambiente circostante, sarà pertanto oggetto di analisi nel prosieguo di questo scritto.

### 3. SCAMBIO TERMICO RADIATIVO TRA CORPO UMANO E AMBIENTE CIRCOSTANTE

La cessione di calore per irraggiamento dal corpo umano verso l'ambiente si esprime mediante la legge di Stefan-Boltzmann:

$$R = A_{\text{eff}} \cdot \epsilon_p \cdot \sigma \cdot (T_{\text{cl}}^4 - T_{\text{umrt}}^4) \quad (2)$$

in cui  $A_{\text{eff}}$  è l'area dell'effettiva superficie esterna radiante del corpo umano, tenuto conto delle sue concavità,  $\epsilon_p$  è l'emissività della superficie corporea radiante,  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann,  $T_{\text{cl}}$  è la temperatura media assoluta del corpo umano nelle sue effettive condizioni di vestiario,  $T_{\text{umrt}}$  è la temperatura assoluta radiante media dell'ambiente riferita alla posizione occupata dal soggetto.

Poiché molti dei materiali impiegati negli edifici presentano un'elevata emissività, sarà possibile trascurare gli effetti dei loro coefficienti di riflessione ed assumere che le superfici emittenti "viste" dal soggetto siano nere. Sarà allora possibile scrivere:

$$T_{\text{umrt}} = \left( \sum_{i=1}^n T_i^4 F_{pi} \right)^{0,25} \quad (3)$$

dove  $T_i$  è la temperatura assoluta della  $i$ -esima delle  $n$  superfici che delimitano l'ambiente ed  $F_{pi}$  è il fattore di vista tra le superfici "viste" dal soggetto e questo stesso. La relazione (3) è soggetta al vincolo che le deriva dalla legge di conservazione dell'energia:

$$\sum_{i=1}^n F_{pi} = 1 \quad (4)$$

La (4) ipotizza implicitamente che la temperatura della  $i$ -esima superficie sia uniformemente pari a  $T_i$ . Ciò non è sufficientemente rispondente al vero per le situazioni riscontrabili in edilizia. Una più accurata approssimazione nei calcoli può comunque essere conseguita suddividendo ciascuna superficie in un numero  $m$  arbitrariamente elevato di sub-superficie, per le quali l'ipotesi di uniformità della temperatura in ogni punto possa essere considerata accettabile.

### 4. CALCOLO DEI FATTORI DI VISTA PERSONA-SUPERFICIE

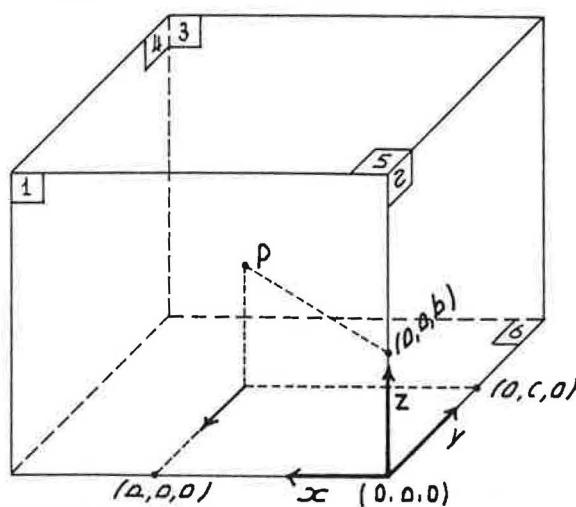
La relazione (3) garantisce che la determinazione della temperatura media radiante, per una data posizione del soggetto, può essere condotta una volta noti i valori delle temperature delle superfici con le quali il soggetto stesso può instaurare uno scambio radiativo e i valori dei fattori di forma relativi a tali superfici. Le temperature superficiali, quando per scopi di analisi progettuale non sia stato loro imposto un valore prestabilito, possono essere calcolate facendo ricorso ai modelli di simulazione del comportamento termico di edifici.

Il calcolo dei fattori di vista si presenta invece estremamente complesso ed è attualmente uno dei punti deboli dell'utilizzo dei metodi automatici per l'analisi delle condizioni di benessere termo-igrometrico.

Nei successivi paragrafi, a partire dalle curve proposte da P.O. Fanger e facendo ricorso ad opportune relazioni geometriche tra le grandezze in gioco, proponiamo degli algoritmi che forniscono i valori dei fattori di vista cercati.

#### 4.1. Relazioni geometriche nel campo radiante

Dal momento che i fattori di vista tra superfici nere, quali quelle che qui si ipotizzano, dipendono solo da grandezze geometriche, è opportuno



**FIGURA 1**  
Sistema cartesiano di riferimento e numerazione convenzionale delle pareti dell'ambiente. La freccia che ha origine nel punto  $P$  indica la direzione verso cui il soggetto guarda

**tabella I - determinazione dei parametri a e c nel sistema di riferimento di figura 1. Il parametro b è assunto pari a 0,6 m per soggetti seduti e a 1,0 m per soggetti in piedi**

Parete	a	c
1	x	y
2	y	x
3	x	$L_2 \cdot y$
4	y	$L_1 \cdot x$
5	x	$H - b$
6	x	b

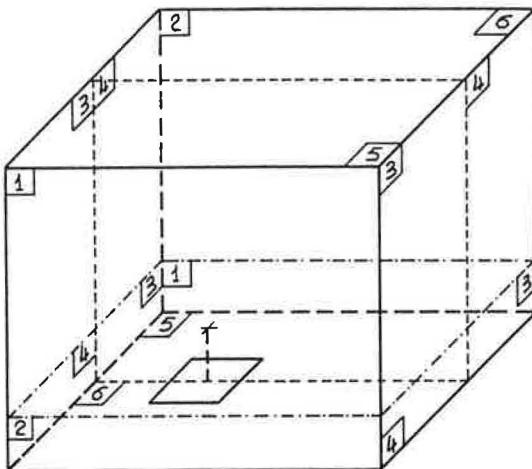
$L_p$  = larghezza della p-esima parete

H = altezza dell'ambiente

predisporre un conveniente sistema di coordinate spaziali, nell'ambito del quale verranno individuati i parametri che caratterizzano il soggetto rispetto all'ambiente circostante.

Nota la collocazione del soggetto, la parete verso cui egli guarda viene convenzionalmente contrassegnata con il numero 1; le altre pareti sono poi numerate progressivamente in senso antiorario; il soffitto ed il pavimento assumono i numeri d'ordine 5 e 6. Sul pavimento la posizione del soggetto è individuata in un sistema di assi cartesiani ( $x, y$ ), come mostrato in figura 1. I parametri  $a, b, c$ , che quotano il punto P nel sistema di riferimento prescelto, assumono nel suddetto sistema di coordinate le espressioni di tabella I.

Un soggetto seduto in un dato punto della stanza determina una suddivisione delle pareti dell'involucro che lo circonda in dodici superfici (fig. 2) che, in virtù delle particolari simmetrie del corpo



**FIGURA 2**

Un soggetto posto in un ambiente "vede" le pareti dell'involucro secondo dodici diverse situazioni geometriche. In virtù delle particolari simmetrie del corpo umano le situazioni distinte si riducono a sei per soggetti seduti ed a tre per soggetti in piedi

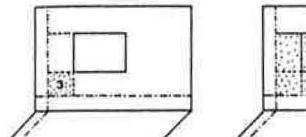
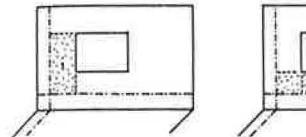
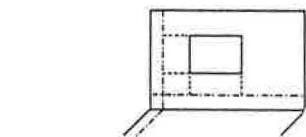
umano, si riducono a sei, corrispondenti alle situazioni di tabella II. Qualunque situazione geometrica vigente nell'ambiente dovrà essere ricordata ad una combinazione di queste sei.

Nel caso di soggetto in piedi, scaturiscono ulteriori simmetrie che ridurranno soltanto a tre le situazioni distinte, in quanto ciascuna delle copie di situazioni 1-2, 3-4 e 5-6 di tabella II potranno, con piccolissimi margini di errore, essere considerate come casi identici.

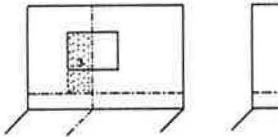
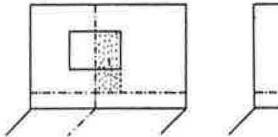
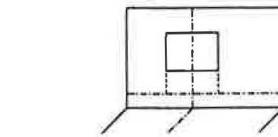
Secondo le ipotesi di Fanger, per il computo dei fattori di vista occorre che la normale condotta dal baricentro della persona alla superficie rettangolare "vista" dal soggetto passi per un punto d'angolo di tale superficie: in tal maniera il fattore di vista dipenderà solo dai parametri adi-

**tabella II - situazioni geometriche distinte corrispondenti ai rettangoli di figura 2**

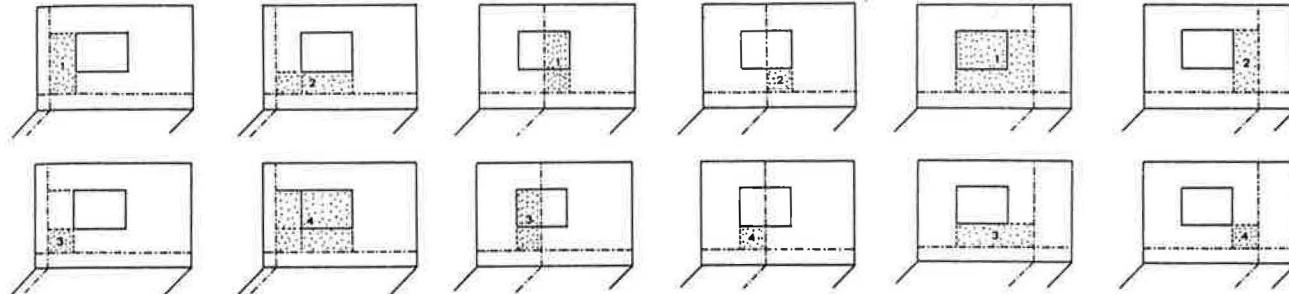
Situazione 1	Rettangolo verticale di fronte la persona e sopra il suo centro, o dietro la persona e sotto il suo centro.
Situazione 2	Rettangolo verticale di fronte la persona e sotto il suo centro, o dietro la persona e sopra il suo centro.
Situazione 3	Rettangolo verticale laterale sopra e davanti o sotto e dietro il centro della persona.
Situazione 4	Rettangolo verticale laterale sotto e davanti o sopra e dietro il centro della persona.
Situazione 5	Rettangolo verticale sul soffitto davanti il centro della persona o sul pavimento e dietro il centro della persona.
Situazione 6	Rettangolo orizzontale sul soffitto e dietro il centro della persona o sul pavimento e davanti il centro della persona.



**FIGURA 3a**  
Calcolo del fattore di vista "persona-finestra", FV. Finestra alla destra della persona.  $FV=FR4-FR1-FR2+FR3$



**FIGURA 3b**  
Calcolo del fattore di vista "persona-finestra", FV. La normale uscente dalla persona intercetta la luce della finestra.  $FV=FR1-FR2+FR3-FR4$



**FIGURA 3c**  
Calcolo del fattore di vista "persona-finestra", FV. Finestra alla sinistra della persona.  $FV=FR1-FR2-FR3+FR4$

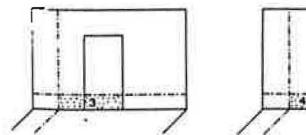
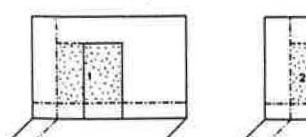
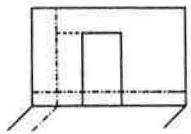
dimensionali a/c e b/c. Se ciò non accade, il fattore di forma potrà ugualmente essere calcolato, in virtù della proprietà additiva di cui esso gode, come somma dei fattori di vista di opportuni rettangoli i cui punti d'angolo appartengano alla normale uscente dal centro della persona.

A partire da queste considerazioni si può stabilire che il fattore di vista tra una persona e qualunque superficie rettangolare costituente l'ambiente circostante è calcolabile in base alle notazioni delle figure 3a, 3b e 3c per pareti dotate di

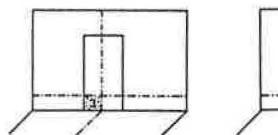
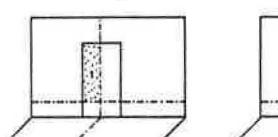
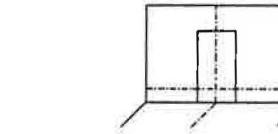
finestra, alle notazioni delle figure 4a, 4b, e 4c per pareti dotate di porte ed alle notazioni di figura 5 per le pareti prive di aperture.

#### 4.2. Algoritmi per il calcolo dei fattori di vista

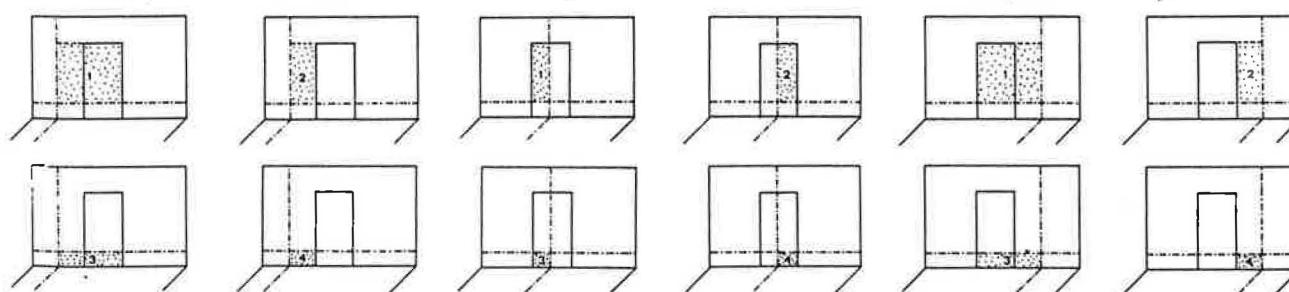
La definizione geometrica dell'ambiente in relazione alla posizione del soggetto consente di determinare i fattori di vista fra questo e le superfici termicamente omogenee da esso "viste".



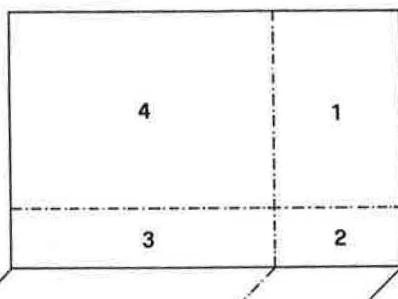
**FIGURA 4a**  
Calcolo del fattore di vista "persona-porta", FP. Porta alla destra della persona.  $FP=FR1-FR2+FR3-FR4$



**FIGURA 4b**  
Calcolo del fattore di vista "persona-porta", FP. La normale uscente dalla persona intercetta la luce della porta.  $FP=FR1+FR2+FR3+FR4$



**FIGURA 4c**  
Calcolo del fattore di vista "persona-porta", FP. Porta alla sinistra della persona.  $FP=FR1-FR2+FR3-FR4$



**FIGURA 5**  
*Calcolo del fattore di vista "persona-parete", FN*  
 $FN = FRI + FR2 + FR3 + FR4$

Poiché il calcolo per via analitica dei fattori di vista si presenta estremamente complesso e laborioso, oltre che poco affidabile per le incertezze sulla individuazione di alcuni fondamentali parametri (ad es. il fattore d'area proiettata), abbiamo preferito seguire la strada della determinazione di relazioni matematiche empiriche, desunte dai grafici forniti da Fanger [2] per ciascuna delle situazioni descritte in tabella II.

Tali grafici consistono notoriamente in famiglie di curve che, in funzione del rapporto  $b/c$ , forniscono in ordinata il valore del fattore di vista per determinati valori del rapporto  $a/c$ .

L'esame di questi diagrammi permette di notare che la curva tipo rappresentativa del fattore di vista cresce con legge esponenziale da un valore nullo (per  $b/c = 0$ ) a un valore di saturazione  $F_\infty$

(per  $b/c = \infty$ ).

Si è perciò ipotizzato che i fattori di vista siano calcolabili per mezzo di un algoritmo dotato dalla seguente struttura:

$$F_{pi} = F_\infty [1 - e^{-(b/c)/(b/c)_0}] \quad (5)$$

nella quale il valore della costante  $(b/c)_0$  è ottenuto a mezzo della tangente mandata alla curva nel punto iniziale ( $b/c = 0$ ).

I valori dei coefficienti sono stati tratti dai grafici di Fanger con letture eseguite per mezzo di un digitizer e memorizzati tramite un personal computer. Sono state così costruite le equazioni complete delle sei famiglie di curve (una famiglia per ciascuna situazione di tabella II) corrispondenti al caso di soggetto seduto e delle tre famiglie di curve corrispondenti al caso di soggetto in piedi, i cui parametri sono riportati in tabella III ed in tabella IV.

Se il valore di  $a/c$  che interessa non è contemplato tra quelli delle tabelle, si eseguirà una semplice interpolazione lineare tra i valori dei fattori di vista forniti dalla (5) per i due valori contigui di  $a/c$  tra i quali esso ricade.

Naturalmente, una volta calcolati tutti i fattori di vista tra la persona e le superfici costituenti l'involucro che la contiene, occorrerà verificare che risulti rispettato il principio di conservazione dell'energia, che impone il vincolo espresso dalla relazione (4).

**tabella III - valori dei coefficienti  $F_\infty$  e  $(a/b)_0$  dell'algoritmo (5) nel caso di soggetto seduto**

$a/c$	Situazione 1		Situazione 2		Situazione 3		Situazione 4		Situazione 5		Situazione 6	
	$F_\infty$	$(b/c)_0$										
0.2	0.019	0.80	0.0125	0.70	0.0161	0.80	0.0125	0.71	0.0161	0.80	0.0111	0.85
0.4	0.036	0.81	0.0245	0.72	0.0311	0.81	0.0281	0.84	0.0311	0.81	0.0215	0.90
0.6	0.052	0.82	0.0360	0.74	0.0443	0.82	0.0410	0.86	0.0451	0.85	0.0318	1.00
0.8	0.064	0.85	0.0445	0.75	0.0571	0.83	0.0500	0.87	0.0561	0.86	0.0402	1.01
1.0	0.075	0.92	0.0525	0.76	0.0661	0.86	0.0581	0.88	0.0661	0.90	0.0480	1.02
1.5	0.092	0.95	0.0665	0.81	0.0841	0.91	0.0711	0.90	0.0841	1.00	0.0620	1.03
2.0	0.103	1.00	0.0751	0.85	0.0961	0.98	0.0810	1.00	0.0961	1.10	0.0718	1.12
3.0	0.117	1.10	0.0851	0.95	0.110	1.10	0.0891	1.02	0.1080	1.20	0.0819	1.20
$\infty$	0.132	1.22	0.1021	1.14	0.131	1.25	0.1041	1.13	0.1290	1.35	0.1020	1.50

tabella IV - valori dei coefficienti  $F_\infty$  e  $(a/b)_\infty$  dell'algoritmo (5) nel caso di soggetto in piedi

	Situazione 1-2		Situazione 3-4		Situazione 5-6	
a/c	F <sub>∞</sub>	(b/c) <sub>o</sub>	F <sub>∞</sub>	(b/c) <sub>o</sub>	F <sub>∞</sub>	(b/c) <sub>o</sub>
0.2	0.0180	0.70	0.0120	0.60	0.0135	1.25
0.4	0.0365	0.75	0.0245	0.70	0.0265	1.30
0.6	0.0495	0.76	0.0370	0.72	0.0380	1.35
0.8	0.0620	0.77	0.0479	0.81	0.0480	1.36
1.0	0.0700	0.78	0.0577	0.85	0.0570	1.39
1.5	0.0850	0.80	0.0730	0.86	0.0720	1.45
2.0	0.0940	0.82	0.0835	0.88	0.0825	1.50
3.0	0.1040	0.90	0.0960	1.00	0.0950	1.56
∞	0.1190	1.02	0.1180	1.15	0.1114	1.80

Poiché, sia a causa delle approssimazioni sul numero delle cifre decimali significative assunto nei calcoli, che a causa degli inevitabili errori di lettura dei dati di riferimento delle curve di Fanger, è improbabile che la somma dei fattori di vista calcolati,  $F_{pi,calc}$ , sia identicamente pari ad uno, è necessario apportare delle piccole correzioni. Ciò è possibile ripartendo la differenza totale riscontrata in parti proporzionali alle aree delle diverse superfici. Chiamando con  $F_{pi,agg}$  il fattore di vista "aggiustato" tra la i-esima superficie e la persona, si avrà dunque:

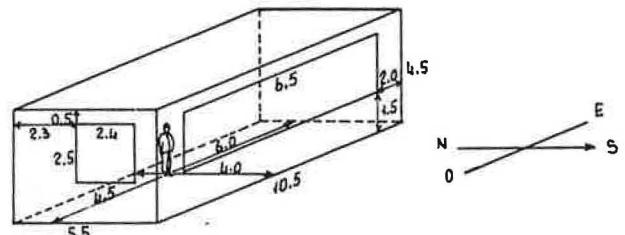
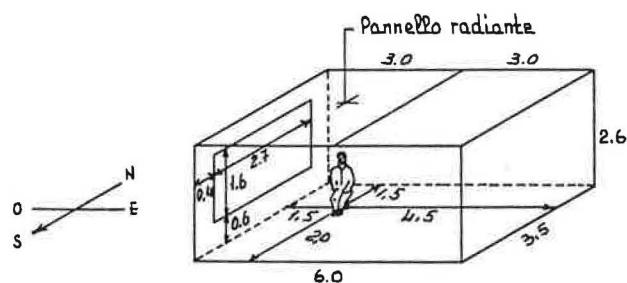
$$F_{pi,agg} = F_{pi,calc} - [F_{TOT} - 1] \cdot F_{pi,calc}/F_{TOT}$$

se  $\sum F_{pi,calc} = F_{TOT} > 1$

$$F_{pi,agg} = F_{pi,calc} + [F_{TOT} - 1] \cdot F_{pi,calc}/F_{TOT}$$

se  $\sum F_{pi,calc} = F_{TOT} < 1$

La validità dei risultati ottenuti con l'applicazione dell'equazione (5) è stata verificata per confronto con i risultati numerici forniti dallo stesso



Parete	Fattori di vista		E%
	Fanger	Equaz. (6)	
Sud	Opaco	0.152	0.144
Est	Opaco	0.033	0.033
Nord	Opaco	0.167	0.170
Ovest	Opaco	0.070	0.072
Ovest	Finestra	0.085	0.082
Soffitto	Opaco	0.038	0.031
Soffitto	Pannello	0.112	0.112
Pavimento	Opaco	0.343	0.344
<b>Totale stanza</b>		1.000	0.988
			-1.2

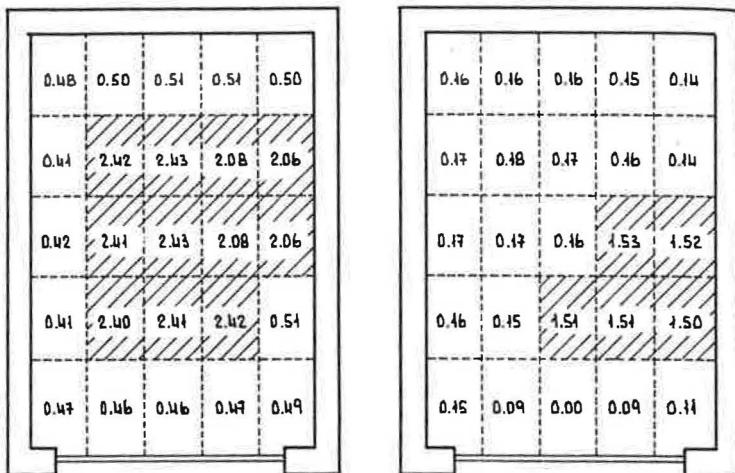
Parete	Fattori di vista		E%
	Fanger	Equaz. (6)	
Sud	Opaco	0.080	0.084
Sud	Finestra	0.073	0.068
Est	Opaco	0.041	0.044
Nord	Opaco	0.304	0.305
Ovest	Opaco	0.053	0.052
Ovest	Finestra	0.015	0.014
Soffitto	Opaco	0.113	0.117
Pavimento	Opaco	0.311	0.314
Totale stanza		0.990	0.998
			- 0.2

**FIGURA 6** - Confronto fra i risultati riportati da P.O. Fanger (rif. [2]) e quelli ottenuti con l'applicazione dell'equazione (5), nel caso di soggetto seduto e soggetto in piedi

## La distribuzione spaziale delle situazioni stazionarie di benessere termico globale negli ambienti moderati

**FIGURA 7**

Distribuzione spaziale del voto medio previsto in un modulo edilizio situato a Messina, durante il "giorno chiaro" di gennaio, alle ore 12 e alle ore 15



Fanger nell'ambito di due esempi, sia nel caso di soggetto seduto che nel caso di soggetto in piedi.

Come si può notare dall'esame della figura 6 e dalle tabelle che la corredano, l'algoritmo (5) ben si presta al calcolo per via analitica dei fattori di vista tra un soggetto e l'ambiente circostante.

È probabile che possano venire apportate delle lievi modifiche ai coefficienti delle tabelle III e IV quando sarà conclusa una campagna di validazione attualmente in atto, che prevede il confronto diretto con dati sperimentali e non più, dunque, tratti dai grafici, ma la bontà della struttura dell'algoritmo e della stessa entità dei coefficienti qui presentati appare confermata dagli esempi illustrati.

### 4.3. Esempio di applicazione

La figura 7 mostra un esempio della distribuzione del voto medio previsto in un modulo edilizio avente dimensioni in pianta di  $3,5 \times 5,0$  m, su un piano posto ad un metro dal pavimento, suddiviso da una griglia a maglie rettangolari ( $0,7 \times 1,0$  m). Si è ipotizzato che il modulo sia situato a Messina e che sia soggetto alle sollecitazioni climatiche del locale "giorno chiaro" di gennaio.

Facendo ricorso alle ipotesi geometriche del paragrafo 4.1. ed utilizzando l'algoritmo (5) per il calcolo dei fattori di vista, abbiamo ottenuto i valori del PMV di una persona dislocata al centro di ciascuna delle 25 maglie, alle ore 12 ed alle ore 15 [9].

Appare subito evidente la forte differenza riscontrata tra i PMVs, persino tra maglie contigue: la presenza della radiazione solare, che va a colpire la parte centrale del pavimento, gioca infatti, in questa particolare situazione, il ruolo principale nel determinare le sensazioni termiche del soggetto che si trova in condizioni di disagio termico. Alle ore 15 invece la zona della stanza nella quale si riscontrano valori eccessivamente elevati di PMV è molto meno ampia.

L'entità dei valori del PMV riscontrati consiglia in questo caso di adottare delle contromisure progettuali, che potrebbero essere qui rappresentate dalla predisposizione di un adeguato "shading" della superficie vetrata durante le ore centrali della giornata.

## 5. CONCLUSIONI

Gli algoritmi qui presentati, che si riferiscono alla componente radiativa del bilancio termico globale del corpo umano, vogliono costituire un contributo per la valutazione automatica delle condizioni di benessere termoigometrico nei diversi punti di un ambiente.

È evidente che un pari livello di definizione sarebbe richiesto nel calcolo delle altre componenti di tale bilancio.

In particolare occorrerebbe poter conoscere, per ciascuna maglia della griglia fittizia in cui la pianta del locale è suddivisa, il valore della velocità relativa dell'aria che vi sta circolando, per calcolare con maggior precisione il contributo termico convettivo.

Infine è auspicabile che le mappe di iso-benessere, che rappresentano una misura della qualità dell'ambiente dal punto di vista delle sensazioni termiche rese ai suoi occupanti, siano affiancate da mappe di iso-illuminamento e da mappe di iso-intellegibilità del parlato, allo scopo di pervenire a definizioni sempre più accurate della qualità globale degli ambienti.

L'appontamento di siffatti metodi di calcolo è infatti uno degli scopi che si prefigge la ricerca nell'ambito della quale questo studio è stato condotto.

#### Bibliografia

- [1] P.O. Fanger - Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation - ASHRAE Trans., 73 (II), 1967.
- [2] P.O. Fanger - Thermal comfort - McGraw Hill, New York, 1972.
- [3] A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk, Y. Nishi - An effective temperature scale based on a single model of human physiolo-
- gical regulatory response - ASHRAE Trans., 70 (I), 1970.
- [4] C.H. Sprague, B. Jai, R.G. Nevins, N.Z. Azer - The prediction of thermal sensation for man in moderate thermal environments via simple thermoregulatory model - ASHRAE Trans., 80 (I), 1974.
- [5] N.Z. Azer, S. Hsu - The prediction of thermal sensation from a simple model of human physiological regulatory response - ASHRAE Trans., 83 (I), 1977.
- [6] G. Alfano, F.R. D'Ambrosio - Benessere termoigrometrico negli ambienti moderati: un confronto tra la trattazione di Fanger e quella di Gagge - Atti del XXXIX Congresso Nazionale dell'Associazione Termotecnica Italiana, CLEUP, Padova, 1984.
- [7] L. Berglund - Mathematical models for predicting the thermal comfort response of building occupants - ASHRAE Trans., 84 (I), 1978.
- [8] "Ambienti termici moderati - Determinazione degli indici PMV e PPD per la valutazione delle condizioni di benessere termico". Progetto di norma U48.05.019.0. settembre 1988.
- [9] A. Giaccone, E.A. Parrino, G. Rizzo - Un metodo computerizzato per la determinazione delle zone di iso-comfort in un ambiente - Quaderni dello IEREN/CNR, n. 3, 1984.
- [10] F. Bonavita, P. Brunello, R. Zecchin, "Metodo di calcolo dei fattori di forma tra corpo umano e superfici interne in un ambiente", Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento, Refrigerazione, n. 2, febbraio, 1989.