

CAPITOLO 6

BENESSERE TERMOIGROMETRICO

6.1 Generalità

Per **benessere termoigrometrico** si intende la sensazione *di soddisfazione che le persone provano all'interno di un ambiente circa la sensazione termica (sentire caldo/freddo)*. In modo simile si parla di benessere ambientale acustico, visivo e olfattivo. L'esperienza ha mostrato che un giudizio positivo sulla sensazione termica provata in un ambiente viene formulato da gran parte delle persone solo in corrispondenza di certi valori assunti da alcune grandezze fisico-tecniche. In condizioni stazionarie, infatti, il benessere termoigrometrico delle persone dipende da sei grandezze, quattro caratterizzanti le **condizioni ambientali**:

- *temperatura dell'aria;*
- *temperatura media radiante delle superfici che delimitano l'ambiente;*
- *umidità relativa dell'aria;*
- *velocità dell'aria;*

e due caratterizzanti gli **individui**:

- *attività fisica svolta [attività metabolica $M = f(\text{attività})$];*
- *resistenza termica dell'abbigliamento (R'_{ab}).*

È opportuno precisare subito che “condizioni di benessere” possono essere ottenute con **molteplici e diverse combinazioni** di queste grandezze. Le considerazioni che saranno presentate si riferiscono ad ambienti in condizioni stazionarie e per permanenze superiori ai 15 minuti.

6.2 Il sistema termoregolatore dell'uomo

Come noto, le nostre funzioni fisiologiche possono esplicitarsi correttamente solo in un intervallo di temperatura assai ristretto, centrato attorno a 37°C. Per poter mantenere pressoché costante la temperatura corporea, l'uomo possiede un sofisticato sistema di “termoregolazione” nell'ipotalamo che, sulla base di stimoli provenienti dai termorecettori posti sulla superficie della pelle, mette in azione strategie compensatrici.

È proprio questo sistema che consente all'uomo di adattarsi e sopravvivere in una vasta gamma di climi, dall'equatore alle latitudini più elevate.

Per inquadrare razionalmente questa problematica si premetteranno alcune nozioni generali. Come noto, nel corpo umano si verifica con continuità una serie di processi chimici che trasformano le sostanze reagenti (cibi + ossigeno) in altre sostanze (cataboliti + anidride carbonica). Dal punto di vista energetico si ha conversione di energia potenziale chimica in energia meccanica e in calore. La potenza energetica M messa in gioco è detta **metabolismo** (ad esempio, per una persona normale in condizioni di riposo, $M \approx 100$ [W]). Nel caso di attività fisiche particolarmente intense, M può raggiungere valori pari a circa 1000 [W]. I meccanismi adottati dal corpo umano per controllare la temperatura corporea sono svariati, ad esempio, per evitare un **decremento**:

- si può **ridurre** il calore disperso verso l'esterno, diminuendo la *temperatura della superficie corporea* t_s , con una **vasocostrizione** periferica della circolazione sanguigna;
- è possibile **aumentare** M modificando il **comportamento** (ad esempio **incrementando** l'attività fisica, **modificando** l'abbigliamento o **spostandosi** in un ambiente meno esposto). Il metabolismo M può essere incrementato anche tramite un **tremore incontrollato** (brividi).

Per evitare, invece, un **incremento** della temperatura corporea:

- si può **aumentare** il calore disperso verso l'esterno con un meccanismo opposto a quello precedentemente accennato, e cioè la temperatura della superficie corporea t_s aumenta come conseguenza di una **vasodilatazione** della circolazione sanguigna periferica;
- si può ancora, per **aumentare** il calore disperso, utilizzare un ulteriore ed efficiente meccanismo che prevede il rilascio sulla pelle, tramite ghiandole sudoripare, di acqua (**sudore**) che evapora a spese del flusso termico $E_t = g \cdot r$ (dove $r =$ *calore di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura corporea* e $g =$ *portata di vapore*).

In generale, si parla di **benessere termoigrometrico** solo quando questi meccanismi fisiologici di controllo della temperatura non intervengono. Da queste considerazioni di carattere generale si evince come per comprendere la complessità e la varietà di questa

problematica sia opportuno prendere le mosse dagli scambi di energia termica e di vapore d'acqua che si attuano tra il corpo umano e l'ambiente circostante.

6.3 Bilancio termico del corpo umano

6.3.1 Considerazioni introduttive

Come si vedrà, gran parte dell'energia metabolica viene smaltita verso l'esterno sotto forma di calore. Per rendersi conto di quanto affermato possono risultare utili alcune considerazioni termodinamiche. Si consideri il sistema “**uomo**” e il circostante sistema “**ambiente**”. Il sistema “**uomo**” dovrà conservare pressoché costante nel tempo il suo stato termodinamico e, pertanto, in un intervallo di tempo $\Delta\tau$ dovrà essere $\Delta S \cong 0$. Il **II Principio** fornisce:

$$\Delta S \cong 0 = \frac{Q}{T} + \Delta S_s$$

Q = calore scambiato nell'intervallo di tempo $\Delta\tau$

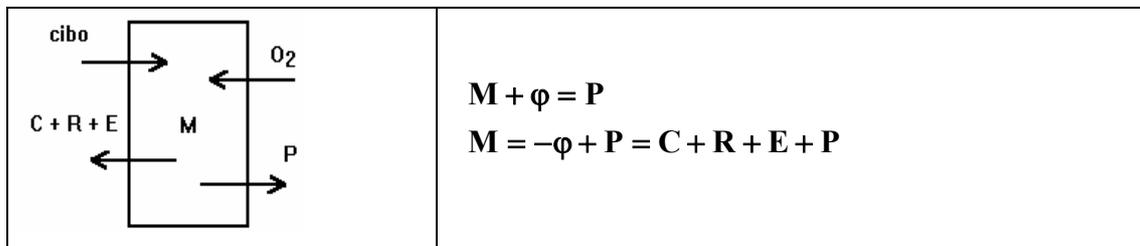
T = temperatura assoluta cui si scambia calore

ΔS_s = variazione di entropia per irreversibilità interne nel tempo $\Delta\tau$

Poiché nel sistema “**uomo**” si verificano processi irreversibili, necessariamente sarà $\Delta S_s > 0$ e quindi per $T > 0$ dovrà essere $Q < 0$. Pertanto, l'uomo dovrà cedere calore all'esterno, cioè dovrà smaltire verso l'ambiente un flusso termico:

$$\varphi = \frac{Q}{\Delta\tau} < 0$$

Scriviamo il bilancio energetico del sistema “**uomo**” (vedi figura). A regime, il metabolismo M (flusso energetico metabolico) dovrà risultare eguale alla somma tra il flusso termico suddetto e la potenza meccanica fornita $P > 0$. Si usa scrivere:



ove le varie grandezze, con dimensioni di potenza, hanno il seguente significato:

- M** = potenza messa in gioco dall'attività metabolica all'interno del corpo [W];
- P** = potenza meccanica fornita [W];
- C** = flusso termico fornito all'esterno per convezione [W];
- R** = flusso termico all'esterno per irraggiamento corpo-oggetti [W];
- E** = flusso termico impegnato per evaporare acqua [W].



Scambi termici uomo- ambiente

Nell'equazione di bilancio **P** è positivo se svolto dal corpo e i termini **C**, **R** ed **E** sono riferiti all'esterno. Si può anticipare che i termini **C** ed **R** potranno risultare, a seconda dei casi, sia positivi (flussi forniti all'esterno) che negativi, mentre **E** è sempre positivo. L'ulteriore possibile scambio termico per conduzione attraverso la pianta dei piedi risulta assai piccolo e viene pertanto trascurato. Se la potenza **M** non è uguale alla potenza totale scambiata con l'esterno (meccanica **P** + termica (**C** + **R** + **E**)), si avrà nel corpo un accumulo (positivo o negativo) d'energia interna, con conseguente aumento o diminuzione nel tempo della temperatura corporea.

6.3.2 La potenza metabolica M

Per tener conto delle differenti corporature degli individui si usa riferire tutti i termini dell'equazione di bilancio all'unità di superficie corporea nuda. Ad esempio, anziché alla potenza metabolica **M** [W] si farà riferimento alla potenza metabolica specifica e cioè al rapporto **M/A** [W/m²]. Una stima attendibile dell'estensione del corpo umano è fornita dalla seguente espressione (area di Dubois):

$$A = 0.202 (m_b)^{0.425} (h_b)^{0.725}$$

ove:

A = superficie corpo umano nudo [m²]; **m_b** = massa [kg]; **h_b** = altezza [m].

La potenza metabolica specifica può essere distinta in due componenti:

- **potenza metabolica basale:** esprime la potenza messa in gioco per il solo funzionamento degli organi vitali. Si misura nel soggetto a riposo fisico e mentale; equivale a circa 43 W/m^2 ;
- **potenza metabolica addizionale:** funzione unicamente dell'attività svolta, dipendente cioè dalle condizioni di lavoro dell'organismo.

La potenza metabolica specifica M/A oltre che in unità SI [W/m^2] viene anche comunemente espressa nell'unità incoerente **met**. Vale la relazione:

$$1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2$$

Indicativamente, **1 met** equivale alla *potenza metabolica specifica di un individuo sano in posizione seduta ed a riposo* (convenzionalmente $A = 1.8 \text{ m}^2$, per persona alta m 1.70 e pesante Kg 70). La potenza metabolica aumenta al crescere dell'attività fisica e/o intellettuale. Si può misurarla direttamente, valutando il consumo d'ossigeno, o desumerla dalle tabelle riportate da specifiche norme tecniche. La tabella riportata di seguito ne fornisce un estratto.



0.8 met



1.1 met



8 met

ATTIVITÀ	POTENZA METABOLICA	
	[W/m ²]	[met]
A riposo		
durante il sonno	40	0,7
sdraiato	46	0,8
seduto	58	1,0
in piedi, rilassato	70	1,2
In cammino (in piano)		
0,89 m/s	115	2,0
1,34 m/s	150	2,6
1,79 m/s	220	3,8
Sedentaria		
lettura	55	0,9
scrittura	60	1,0
in piedi, lavoro d'archivio	80	1,4
Artigianale		
falegname	100-175	1,7-3,0
muratore	110-160	1,9-2,8
Grafica		
disegnatore	115	2,0
Varie		
ginnastica	175-235	3,0-4,0
tennis	210-270	3,6-4,6

POSIZIONE DEL CORPO	POTENZA METABOLICA [W/M ²]
seduto	10
inginocchiato	20
in piedi	25
in piedi, curvato	30

TIPO DI LAVORO	POTENZA METABOLICA [W/M ²]
con le mani	30
con un braccio	55
con ambo le braccia	85
con il tronco	190

Oltre al livello dell'attività metabolica **M** occorre tener conto dell'abbigliamento che costituisce una **resistenza termica** posta sopra la pelle. Si introduce quindi la resistenza termica specifica dell'abbigliamento **R'_{ab}**.

La resistenza **R'_{ab}** [m² K/W], oltre che nelle consuete unità **SI** viene anche espressa attraverso un'altra unità non coerente detta "**clo**".

Sussiste la relazione:

$$1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ K/W.}$$

Nella seguente tabella si riportano valori tipici della resistenza termica di alcuni tipici abbigliamento. Tali valori in genere vengono misurati mediante l'utilizzo di opportuni manichini riscaldati.

Tipo di abbigliamento	Resistenza termica [m ² K/W]	Resistenza termica [clo]
Persona nuda	0	0
Calzoncini	0.015	0.1
Vestiario tipico tropicale	0.045	0.3
Vestiario leggero estivo	0.08	0.5
Vestiario leggero da lavoro	0.11	0.7
Vestiario invernale da interno	0.16	1.0
Vestiario invernale da esterno	0.23	1.5

6.3.3 Potenza meccanica scambiata con l'esterno P

A riguardo del termine **P** è opportuno osservare che in alcuni casi una piccola parte della potenza metabolica può ritrovarsi in **potenza meccanica**; per esempio, un individuo che solleva un oggetto in un certo tempo trasferisce all'esterno una potenza meccanica **P > 0** [W]. Si usa definire, per le diverse attività di un individuo, un **rendimento meccanico η** dato dal rapporto tra la potenza meccanica **P** e la potenza metabolica **M**, ovvero:

$$\eta = \frac{P}{M}$$

L'equazione di bilancio del corpo umano potrà quindi scriversi:

$$M - P = M(1 - \eta) = C + R + E \quad [W]$$

dove il termine **M(1 - η)** rappresenta il flusso termico che, in condizioni di regime, viene ceduto all'ambiente circostante.

Il rendimento meccanico del corpo umano è, ad ogni modo, molto basso, oscillando tra 0 e 0.2, ed è leggermente crescente al crescere della potenza meccanica. Ad esempio, un soggetto che, al cicloergometro, compie un lavoro cui corrisponde una potenza meccanica di 20 W, ha un metabolismo energetico di 200 W, con rendimento del 10%; passando ad una potenza di 40 W, il metabolismo sale mediamente a 260 W, con un rendimento del 15 %.

Il corpo umano può essere quindi considerato come una macchina termica *a basso rendimento*: e cioè per ottenere una potenza meccanica **P** deve mettere in gioco la potenza metabolica **M** che è a sua volta ottenuta da una "combustione controllata"

del “cibo”. La potenza metabolica M viene in piccola percentuale trasformata nella potenza meccanica P e, in gran parte, riversata nell’ambiente, nuovamente, sotto forma della potenza termica ($C + R + E$).

6.3.4 Flusso termico scambiato per convezione C

Il flusso termico scambiato per convezione tra la superficie esterna del corpo umano più o meno abbigliato con l'aria ambiente (termine C) può considerarsi somma di due termini: l'uno dovuto al fenomeno della respirazione C_{resp} (l'aria si riscalda per convezione termica all'interno dei polmoni), l'altro C_{conv} allo scambio per convezione tra la superficie esterna del corpo umano più o meno abbigliato. L’entità dello scambio termico C dipenderà, quindi, dalle seguenti variabili:

- *temperatura dell’aria t_a ;*
- *temperatura media della superficie esterna del corpo (superficie abbigliata) t_{ab} ;*
- *tipo di vestiario e cioè sua resistenza termica R'_{ab} tra la pelle a temperatura t_s e la superficie esterna degli abiti t_{ab} ;*
- *velocità relativa dell’aria w_a .*

In riferimento alle **sole grandezze caratteristiche dell’ambiente**, risulta:

$$C = f(t_a, w_a)$$

Per una persona seduta, è importante la velocità media dell’aria attorno ad essa, se invece essa è in movimento, è essenziale la velocità relativa dell’aria rispetto al corpo. L'entità di questo flusso termico può, come già osservato, essere regolata dal sistema di termoregolazione del corpo umano, attraverso un innalzamento (o un abbassamento) della temperatura media cutanea t_s .

6.3.5 Flusso termico scambiato per irraggiamento R

Il flusso termico scambiato per irraggiamento tra la superficie esterna del corpo umano più o meno abbigliato e l'ambiente circostante può essere valutato sulla base di quanto noto dalla trasmissione del calore.

In particolare, una persona in un ambiente può essere considerata come un corpo piccolo in un grande ambiente. Si ricorda che, poiché le varie superfici delimitanti l’ambiente sono caratterizzate da diverse temperature, si usa introdurre la **temperatura media radiante** delle pareti t_{mr} definita come la *temperatura delle pareti di un ambiente virtuale, per il quale tale temperatura sia uniforme ed in cui il soggetto*

scambierebbe per irraggiamento la stessa quantità di flusso termico che scambia nell'ambiente reale.

La temperatura media radiante assoluta T_{mr} , dipende dalle temperature superficiali assolute elevate alla quarta potenza pesate con i relativi fattori di vista, ad esempio, per una persona (indice p) all'interno di un locale delimitato da due superfici (1 e 2) a temperature T_{s1} e T_{s2} con fattori di vista F_{p1} e F_{p2} risulta:

$$T_{mr}^4 = \sqrt[4]{F_{p1} \cdot T_{s1}^4 + F_{p2} \cdot T_{s2}^4}$$

e, con buona approssimazione, anche:

$$t_{mr} \cong F_{p1} \cdot t_{s1} + F_{p2} \cdot t_{s2}$$

In altre parole, la temperatura media radiante consente di assimilare un qualunque ambiente ad uno equivalente con però tutte le pareti isoterme (temperatura t_{mr}). L'entità dello scambio termico R dipenderà, quindi, dalle seguenti variabili:

- temperatura **media radiante** delle pareti t_{mr} ;
- temperatura media della superficie esterna del corpo (superficie abbigliata) t_{ab} ;
- tipo di vestiario e cioè sua resistenza termica R'_{ab} tra la pelle a temperatura t_s e la superficie esterna degli abiti t_{ab} ;
- emissività della superficie abbigliata (in genere $\varepsilon \cong 0.95$).

In riferimento alle **sole grandezze caratteristiche dell'ambiente**, risulta:

$$R = f(t_{mr}).$$

6.3.6 Flusso termico dovuto ad evaporazione, E

Il flusso termico E ceduto per evaporazione cutanea può considerarsi come somma di **tre diversi contributi**:

- E_r dovuto alla respirazione: l'aria entra nei polmoni relativamente secca e ne fuoriesce con umidità assoluta maggiore;
- E_d dovuto all'acqua che evapora dal corpo umano, passando (diffondendo) attraverso la pelle (si parla, in questo caso, di un processo di diffusione di vapore);
- E_t dovuto al fenomeno della traspirazione che si manifesta attraverso il ricoprimento della pelle da parte di un film d'acqua (sudore), la cui emissione da parte d'opportune ghiandole sudoripare è regolata dal sistema di termoregolazione del corpo umano.

Per quanto riguarda la dipendenza di E dai parametri ambientali, si può osservare che E dipenderà sia dalla temperatura dell'aria t_a che dalla sua umidità relativa i_a :

$$E = f(t_a, i_a)$$

Il flusso termico $R + C$, scambiato dal corpo umano attraverso i meccanismi dell'irraggiamento e della convezione, viene detto **flusso sensibile**, in quanto ad esso può corrispondere un'effettiva variazione della temperatura dell'ambiente circostante.

Il flusso termico E , messo in gioco per l'evaporazione di acqua interna, viene detto, invece, **flusso latente** in quanto esso si manifesta solo attraverso una *produzione di vapore* cui non corrisponde una variazione misurabile della temperatura dell'ambiente.

In conclusione, il flusso termico complessivo:

$$\phi_{Tot} = R + C + E \text{ (sensibile + latente)}$$

dipende, per ogni condizione d'attività fisica e modalità d'abbigliamento, da quattro parametri ambientali, influenzanti l'equilibrio termico dell'uomo, e cioè: la **temperatura dell'aria**, la **temperatura media radiante**, la **velocità dell'aria**, l'**umidità dell'aria**.

Al fine di ridurre il numero di variabili l'influenza della temperatura dell'aria e della temperatura media radiante possono essere riassunte in una sola grandezza detta **temperatura operativa** t_0 . A questo fine si può scrivere:

$$R + C = \alpha_{irr} \cdot A \cdot (t_{ab} - t_{mr}) + \alpha_c \cdot A \cdot (t_{ab} - t_a)$$

ove ovviamente $\alpha_i = \alpha_{irr} + \alpha_c$.

Se ora si impone:

$$R + C = \alpha_i \cdot A \cdot (t_{ab} - t_0)$$

è possibile ricavare il valore cercato della temperatura operativa:

$$t_0 = \frac{\alpha_{irr} \cdot t_{mr} + \alpha_c \cdot t_a}{\alpha_i}$$

In molti casi pratici risulta che $\alpha_{irr} \cong \alpha_c$ per cui risulta anche:

$$t_0 \cong (t_{mr} + t_a) / 2$$

6.4 Relazione di Fanger

Come già accennato, la condizione di benessere termoigrometrico di una persona corrisponde ad una condizione di “**neutralità termica**” nella quale l’individuo non avverte né sensazione di caldo né di freddo e cioè ad una condizione che veda il “**non intervento**” dei meccanismi fisiologici deputati al controllo della temperatura corporea. Ad esempio, se una persona controlla la sua temperatura corporea sudando vistosamente o rabbrivendo, difficilmente si potrà parlare di “**benessere termoigrometrico**”. Ovviamente, la parziale soggettività delle sensazioni introduce elementi di imprevedibilità per cui una valutazione sufficientemente oggettiva delle condizioni di benessere dovrà far riferimento ad indagini di tipo statistico. Se i singoli termini che compaiono nell'equazione di bilancio termico del corpo umano:

$$M(1 - \eta) = C + R + E$$

vengono espressi in forma estesa (e cioè in funzione del tipo di attività svolta, dell'abbigliamento e delle condizioni ambientali) si può scrivere un'equazione del tipo:

$$f(M, \eta, R'_{ab}, t_{mr}, t_a, i_a, w_a, t_s, E_t) = 0$$

Nell’equazione di bilancio ottenuta (non riportata in forma estesa) compaiono esplicitamente le seguenti grandezze:

- *grandezze fisico-tecniche caratterizzanti le condizioni ambientali:*
 - temperatura dell’aria, t_a ;
 - umidità relativa dell’aria, i_a ;
 - velocità dell’aria, w_a ;
 - temperatura media radiante, t_{mr} ;
- *grandezze tipiche del soggetto:*
 - attività svolta: M, η ;
 - abbigliamento, R'_{ab} ;
- *grandezze governate dal sistema di termoregolazione fisiologico:*
 - temperatura della pelle, t_s ;
 - potenza termica dispersa per traspirazione, E_t

Si può precisare che per ogni condizione di attività, ambientale e di abbigliamento, il sistema di termoregolazione agisce variando sia t_s , che E_t per soddisfare il bilancio termico del corpo ed evitare quindi variazioni inaccettabili della temperatura corporea. È importante evidenziare che il soddisfacimento del bilancio energetico non implica, come già osservato, condizioni di benessere termoigrometrico.

Sulla base di esperienze condotte su gran numero di soggetti in condizione di dichiarato benessere termico, **Fanger** ha potuto stabilire che *su base statistica* e in condizioni di *dichiarato benessere* le grandezze t_s ed E_t (controllate dal sistema fisiologico di termoregolazione) non sono indipendenti dall'attività svolta ma possono essere correlate a questa dipendenti in base a due relazioni del tipo:

$$t_s = f(M/A, \eta)$$

$$E_t = f'(M/A, \eta)$$

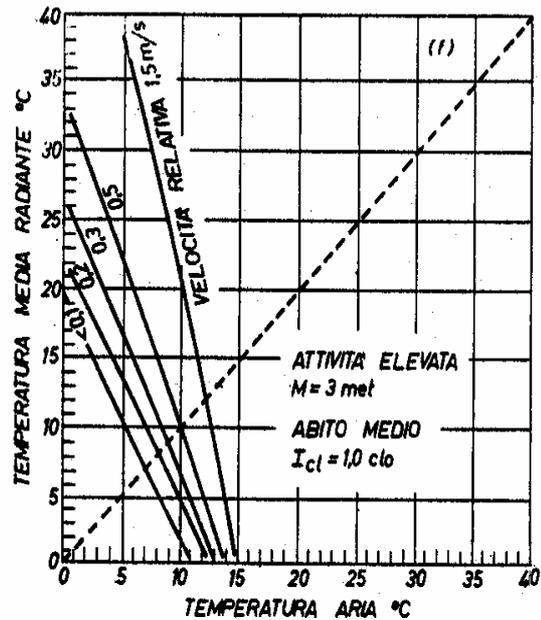
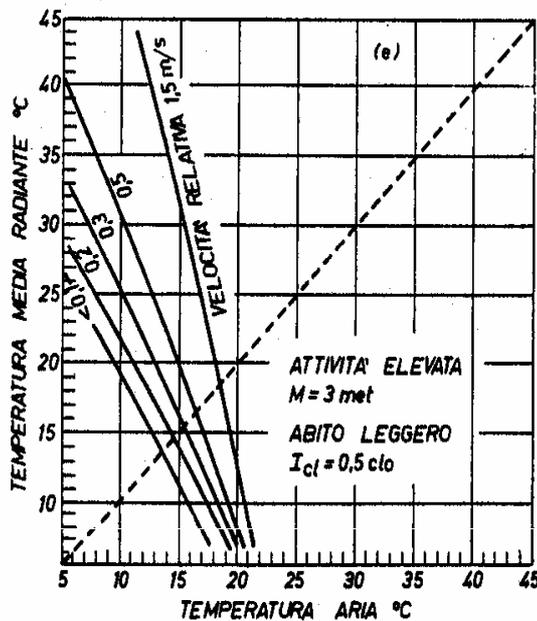
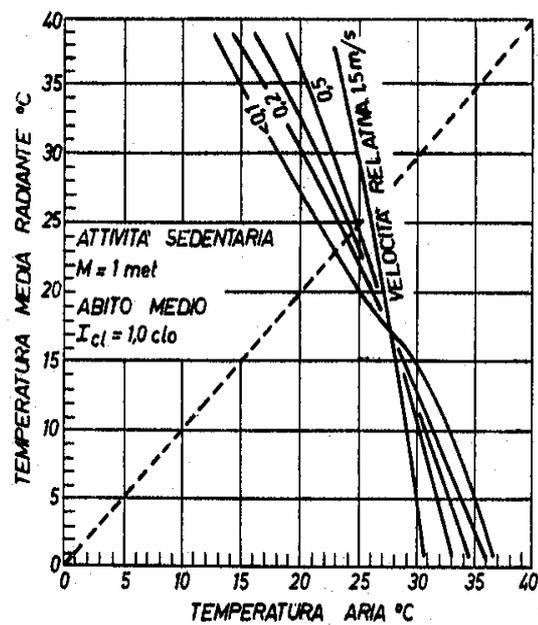
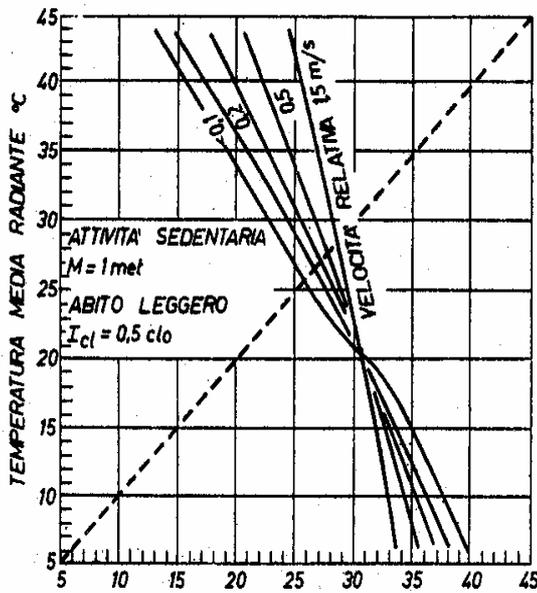
Se queste relazioni vengono inserite nel bilancio termico del corpo si possono eliminare dall'equazione di bilancio t_s ed E_t per ottenere la ben nota **equazione del benessere di Fanger**. L'equazione di Fanger risulta pertanto esprimibile nella forma:

$$f(M/A, \eta, R'_{ab}, t_{mr}, t_a, i_a, w_a) = 0$$

L'equazione lega tra loro sei variabili: due legate al soggetto (abbigliamento e attività), quattro ambientali (temperatura e velocità dell'aria, umidità dell'aria e temperatura media radiante). Ad esempio, fissati M/A , η , R'_{ab} , è possibile determinare quali combinazioni delle grandezze (t_a, t_{mr}, i_a, w_a) assicurino condizioni di benessere, che, ovviamente sono infinite.

In genere (almeno per umidità comprese tra il 30 ed il 70%) l'influenza dell'umidità relativa dell'aria sul benessere è ridotta. La soluzione algebrica dell'equazione si presenta laboriosa, per cui in genere si ricorre ad opportuni diagrammi.

A titolo di esempio si riportano alcuni diagrammi ove, trascurando l'effetto della i_a , sono riportate le linee di benessere, cioè linee che soddisfano la relazione di **Fanger**. Su ciascun diagramma le linee sono tracciate per cinque differenti velocità dell'aria.



I diagrammi mettono in evidenza come la temperatura media radiante, nel caso di basse velocità dell'aria, assume quasi la stessa importanza della temperatura dell'aria ambiente. Pertanto, con riferimento alle condizioni invernali, tanto minore sarà la temperatura media delle pareti, tanto maggiore, a parità d'abbigliamento, dovrà essere la temperatura dell'aria.

6.5 Indici per la valutazione delle condizioni di benessere

La valutazione delle condizioni di benessere in relazione ad una situazione ambientale, e cioè il gradimento di un ambiente da parte degli individui, può essere espressa mediante un opportuno indice razionale **PMV (Predicted Mean Vote)**.

Al fine di introdurre questo indice si fa riferimento al concetto di *carico termico L*:

$$L = M(1 - \eta) - M^*(1 - \eta)$$

e cioè alla differenza **L** tra la potenza termica dispersa dal corpo umano nella situazione in esame e la potenza che questo dovrebbe disperdere per trovarsi in condizioni di dichiarato benessere (grandezze con asterisco).

Quando risulti **L = 0**, il soggetto si trova in condizioni di “**neutralità termica**” e cioè di benessere, scostamenti crescenti di segno positivo sono indice di una sensazione di caldo via via più marcata, mentre scostamenti di segno opposto sono indice di una sensazione via via più marcata di freddo. Per quantificare una scala numerica di *sensazione termica soggettiva* si può fare riferimento all’espressione di un voto secondo la seguente tabella (scala ASHRAE):

VOTO	Sensazione termica soggettiva
+ 3	Molto caldo
+ 2	Caldo
+ 1	Leggermente caldo
0	Confortevole – neutralità
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

L’indice **PMV** rappresenta il valore medio del voto relativo alla situazione ambientale considerata espresso da un campione di persone, in definite condizioni d’attività e vestiario. Si parla di voto medio poiché le singole votazioni presentano ovviamente un certo grado di dispersione.

Secondo Fanger il **voto medio previsto, PMV**, può essere espresso in funzione di **L** nel seguente modo:

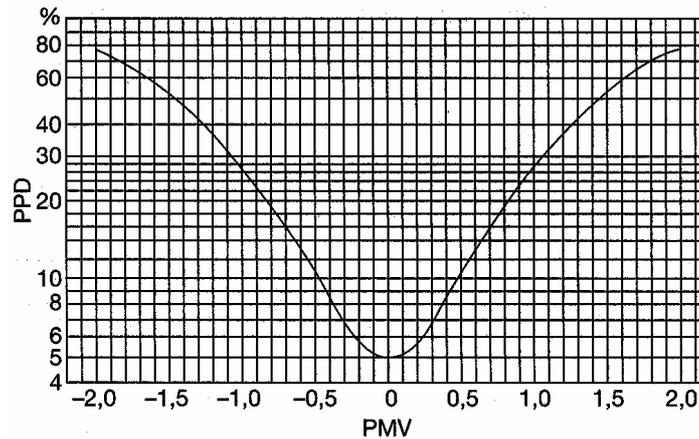
$$PMV = [0.303 \cdot e^{-0.036 \cdot \frac{M}{A}} + 0.028] \cdot L$$

Le informazioni fornite dall'indice **PMV** sono state integrate dalla percentuale delle persone insoddisfatte (**PPD** o **Predicted Percentage of Dissatisfied**), ritenendo tali coloro che votavano valori di "sensazione" al di fuori dei valori -0.5 e $+0.5$.

L'indice **PPD** può, secondo Ranger, essere calcolato in funzione dell'indice **PMV** con la seguente relazione:

$$\text{PPD} = 100 - 0,95 \cdot e^{(-0,03353 \cdot \text{PMV}^4 + 0,2179 \cdot \text{PMV}^2)}$$

In tal modo è stato ottenuto il diagramma riportato in figura il quale mostra come, anche per **PMV = 0**, risulti **PPD = 5%**, non esistono condizioni ambientali che possano soddisfare il 100% delle persone. Il massimo ottenibile su base statistica è, quindi, il soddisfacimento del 95% delle persone.



Molte norme tecniche considerano condizioni ambientali accettabili per il benessere quelle che siano ritenute tali da almeno l'80% degli individui. In conseguenza, risulta:

$$0.5 \leq \text{PMV} \leq +0.5$$

Si tenga presente che le ricerche sono state eseguite su studenti universitari pertanto è da ritenere che nei normali ambienti, ove l'età degli occupanti, le condizioni psicofisiche, l'abbigliamento, ecc. degli individui sono sicuramente più vari di quanto non siano stati nelle esperienze condotte da Fanger, la percentuale di insoddisfatti possa anche essere più ampia. Le precedenti considerazioni evidenziano come sia impensabile realizzare un microclima ambientale giudicato confortevole da tutti.

6.6 Disagio termico locale

L'indice **PMV** ed altri indicano l'impatto dell'ambiente termico sul corpo umano nel suo complesso, ma anche se il **PMV** prevede una neutralità termica in un ambiente, si può verificare una situazione di "**discomfort**" dovuta ad un indesiderato riscaldamento o raffreddamento localizzato in qualche parte del corpo (disagio locale).

Il disagio può essere causato da un'eccessiva differenza di temperatura dell'aria tra la testa e i piedi, da un pavimento troppo caldo/freddo, da una velocità dell'aria eccessiva (corrente) o da eccessiva asimmetria della temperatura radiante. La neutralità termica espressa, pertanto, dai limiti **PMV** non è sufficiente ad accertare il benessere termico di un ambiente confinato. Occorre, infatti, soddisfare altri requisiti relativi al disagio locale che, è opportuno precisare, risulta più avvertito da persone impiegate in lavori sedentari. Alcuni dei fattori più importanti sono elencati qui di seguito.

● **Differenza verticale della temperatura dell'aria**

Se in un ambiente la temperatura dell'aria all'altezza del capo differisce sensibilmente dalla temperatura dell'aria prossima agli arti inferiori gli occupanti l'ambiente possono provare una sensazione di disagio. Se si accetta un 5% di persone insoddisfatte, la differenza di temperatura tra capo e arti inferiori deve essere inferiore a 3°C. Normalmente risulta abbastanza facile soddisfare questo limite nei comuni ambienti di un edificio, mentre si possono avere difficoltà in spazi ristretti, ad esempio nelle automobili.

● **Pavimenti caldi e freddi**

Se la temperatura superficiale del pavimento è troppo bassa o troppo elevata, gli arti inferiori degli occupanti possono provare una sensazione di fastidio. Per persone con normali calzature leggere da interni, il materiale di cui è costituito il pavimento ha un'importanza soltanto marginale; mentre il parametro più importante è rappresentato dalla sua temperatura superficiale. L'intervallo di temperatura che lascia solo il 10 % di insoddisfatti corrisponde a 19-29°C. Si può ancora ricordare che in ambienti ove le persone possono essere scalze (camere da letto, piscine, stanze da bagno, etc.) la sensazione di benessere può dipendere anche dalla natura del materiale. Nella seguente tabella, per diversi materiali, sono indicati, a titolo di esempio, gli intervalli di temperatura confortevoli per una persona a piedi nudi.

Materiale	Intervallo di temperatura
Pietra, marmo, cemento	27 ÷ 30°C
Linoleum, PVC	25 ÷ 29°C
Legno	23 ÷ 28°C
Tessuto (tappeti)	21 ÷ 28°C

● **Radiazione asimmetrica**

Una persona esposta a radiazione asimmetrica può provare sensazione di disagio. La combinazione di soffitto riscaldato e parete fredda è quella che presenta la sensazione di maggiore disagio. Dalle norme è indicato un limite di 5°C di asimmetria della temperatura radiante sotto un soffitto riscaldato e di 10°C presso una parete fredda (in genere finestra). Ambedue questi limiti corrispondono a circa il 5% di persone insoddisfatte.

● **Corrente d'aria**

La corrente è definita come indesiderato raffreddamento di una parte del corpo causato dal movimento dell'aria. Le fluttuazioni della velocità dell'aria nel tempo provocano un gradiente temporale ripido della temperatura della pelle; probabilmente sono i segnali inviati al cervello da questi gradienti a provocare la sensazione di disagio. Questo aumenta con il diminuire della temperatura dell'aria. Dalle ricerche svolte è emerso che le persone sono più sensibili al movimento dell'aria di quanto non si fosse previsto in passato.

● **Esigenze di benessere durante lavori sedentari (uffici)**

Come descritto in precedenza, l'equazione di Fanger consente di valutare con precisione le condizioni di benessere ambientale. In molti casi d'interesse pratico (umidità relative dell'aria comprese tra 30 e 70 %) si può ricorrere a fini progettuali a valutazioni più approssimate. A questo scopo si usa fare riferimento alla temperatura operativa t_o , che, come già ricordato, congloba in una sola grandezza l'influenza dei parametri ambientali t_{mr} e t_a .

In quest'ottica le esigenze di benessere invernali ed estive per persone che svolgono un lavoro leggero, per la maggior parte sedentario, sono elencate nella seguente tabella. Si presume un abbigliamento pari a 1 clo durante l'inverno e 0.5 clo per l'estate. Tali valori comprendono molti casi pratici in uffici, abitazioni, industria leggera con bassa attività fisica (1.2 met).

ESIGENZE DI BENESSERE PER PERSONE IN ATTIVITÀ LEGGERA (1.2 met)
INVERNO (1 clo)
a) Temperatura operativa t_o compresa tra 20 e 24°C. b) Differenza verticale della temperatura dell'aria tra 0.1 m e 1.1 m dal pavimento inferiore a 3°C. c) Temperatura del pavimento compresa tra 19°C e 29°C. d) Velocità media dell'aria inferiore a 0.15 m/s. e) Asimmetria della temperatura radiante vicino alle finestre o altre superfici verticali fredde inferiore a 10°C. f) Asimmetria della temperatura radiante causata da un soffitto riscaldato inferiore a 5°C.
ESTATE (0.5 clo)
a) Temperatura operativa compresa tra 23 e 26°C. b) Differenza verticale della temperatura dell'aria tra 0.1 m e 1.1 m dal pavimento inferiore a 3°C. c) Velocità media dell'aria inferiore a 0.25 m/s.

6.7 Cenni sulla qualità dell'aria negli ambienti

Per **qualità accettabile dell'aria** s'intende *aria nella quale non sono presenti sostanze inquinanti, a concentrazioni tali da poter dar luogo a effetti nocivi sulla salute (e cioè a problematiche di carattere sanitario), oppure a concentrazioni tali da far sì che una notevole percentuale di persone (ad esempio 80%) non abbia da esprimere insoddisfazione nei riguardi della sua qualità (problema di benessere).*

Si può osservare che una maggiore attenzione dei tecnici, al riguardo della qualità dell'aria, è in parte conseguenza diretta delle misure che sono state via via introdotte per realizzare forme di risparmio energetico. Ad esempio, diminuzione dei tassi di ventilazione con aria esterna pura, utilizzo di nuovi materiali sintetici, di vernici ecc, che possono emettere sostanze gassose inquinanti.

I diversi agenti che contaminano l'aria ambiente possono essere suddivisi in due tipi:

- *particelle* (solide o gocce)
- *gas e vapori*

In entrambi i casi alcuni sono semplicemente fastidiosi, altri invece sono, o si ritiene che siano, nocivi alla salute. I contaminanti che provocano fastidio possono pregiudicare il benessere delle persone, pur non presentando un pericolo per la salute. Tra le *particelle* si possono comprendere fumo da tabacco, polline o spore, batteri e virus, e particelle inalabili in genere; *gas e vapori* di particolare interesse per questo problema sono: ossido di carbonio, anidride carbonica, aldeidi, composti organici volatili, ossidi d'azoto.

Alcuni agenti inquinanti entrano negli ambienti con l'aria immessa a scopo di ventilazione oppure a causa di infiltrazioni incontrollate. Molte sostanze inquinanti

vengono emesse da fonti presenti negli ambienti: le persone stesse sono fonte di CO₂, di vapor d'acqua e di sostanze biologiche definiti complessivamente "odori corporei".

Cause d'inquinamento sono anche riferibili alle attività svolte dalle persone negli ambienti, come: fumo, pulizie domestiche, attività che prevedono incollature, verniciature, o anche le operazioni di cucina. Gli stessi materiali da costruzione e di rifinitura impiegati in edilizia possono emanare sostanze gassose inquinanti; altre fonti possono essere i mobili, le macchine e le attrezzature per ufficio, gli apparecchi per il riscaldamento e le cucine a gas prive o quasi di scarico verso l'esterno.

Infine, anche l'ambiente esterno può essere origine di inquinamento attraverso l'aria di ventilazione poco pulita, o si possono verificare immissioni di inquinanti all'interno degli ambienti per altre cause (perdite, scarichi, etc.).

Gli stessi impianti di riscaldamento e ventilazione, gli impianti idraulici, in edifici in cui la manutenzione non è sufficiente, possono dar luogo alla formazione di "**nicchie ambientali**" dove gli organismi patogeni o allergizzanti (ad esempio acari, etc.) si raccolgono e proliferano immettendosi poi nuovamente nell'aria.

Il controllo della qualità dell'aria negli ambienti viene affrontato:

- introducendo negli ambienti stessi un'opportuna portata di "**aria esterna pura**" per diluire i prodotti inquinanti prodotti all'interno degli ambienti (provvedimento opinabile quando l'aria esterna risulti più o meno inquinata);
- cercando di rimuovere la sostanza inquinante laddove si genera (ad esempio cappe aspiranti delle cucine);
- riducendo l'entità delle fonti inquinanti interne.

Gli effetti sul benessere e sulla salute conseguenti a quanto ricordato non sono ancora definiti in modo preciso.

1) In un ambiente sono presenti **20** persone con un livello di attività metabolica pari **1.2 Met** ($A = 1.8 \text{ m}^2$; $1 \text{ Met} = 58 \text{ W/m}^2$). Se la produzione di vapore per persona è pari a **50 g/h** valutare i complessivi flussi sensibili φ_{sen} e latenti φ_{lat} prodotti dalle persone.

Il flusso totale (sensibile + latente) smaltito dalle persone è:

$$\varphi_{\text{Tot}} = 1.2 \cdot 58 \cdot 1.8 \cdot 20 = 2505 \text{ [W]}$$

Il flusso latente complessivo prodotto è:

$$\varphi_{\text{lat}} = 20 \cdot r \cdot g_v \cong 20 \cdot r_0 \cdot g_v = 20 \cdot 2501 \cdot 10^3 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-3}}{3600} = 695 \text{ [W]}$$

$$\varphi_{\text{sen}} = \varphi_{\text{Tot}} - \varphi_{\text{lat}} = 1810 \text{ [W]}$$

2) All'interno di un locale si misura una temperatura media radiante $t_{\text{mr}} = 16 \text{ [}^\circ\text{C]}$ e una temperatura dell'aria $t_a = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Nel caso che i coefficienti di scambio convettivo e di irraggiamento della superficie abbigliata del corpo siano eguali valutare la temperatura operativa t_o

La temperatura operativa è:

$$t_o = \frac{\alpha_{\text{irr}} \cdot t_{\text{mr}} + \alpha_c \cdot t_a}{\alpha_i}$$

Nel nostro caso è anche $\alpha_{\text{irr}} \cong \alpha_c$ per cui risulta:

$$t_o \cong (t_{\text{mr}} + t_a) / 2 = 18 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

3) Si consideri un ambiente cubico con dimensioni $3 \times 3 \times 3 \text{ [m]}$. La temperatura superficiale interna su 5 facce quadrate (superficie **1**) è $t_{s1} = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$, mentre una faccia è costituita da una parete interamente vetrata (superficie **2**) a temperatura superficiale $t_{s2} = 10 \text{ [}^\circ\text{C]}$. La temperatura interna dell'aria sia $t_a = 21 \text{ [}^\circ\text{C]}$, l'umidità assoluta $x = 7 \text{ [g/kg]}$.

Il fattore di vista F_{p2} persona-superficie vetrata (una persona può essere assimilata ad una piccola superficie sferica (indice **p**) al centro della stanza) risulta per ragioni di simmetria:

$$F_{p2} = 1/6 = 0.167$$

Ovviamente risulta :

$$F_{p1} = 1 - F_{p2} = 0.833$$

Con buona approssimazione risulta:

$$t_{mr} \cong F_{p1} \cdot t_{s1} + F_{p2} \cdot t_{s2} = 18.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura operativa è:

$$t_o = \frac{21 + 18.3}{2} = 19.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dal diagramma ASHRAE per $t_a = 21 \text{ } [^\circ\text{C}]$ e $x_a = 7 \text{ } [\text{g}/\text{kg}]$ risulta $i_a \approx 45 \text{ } \%$ e cioè l'umidità relativa dell'aria si situa all'interno della fascia (30-70 %) entro cui la sua influenza sul benessere è poco significativa. Nell'ipotesi di persone in attività sedentaria ($M/A = 1 \text{ met}$), abito medio ($I_{cl} = 1$) e velocità $w_a = 0,2 \text{ m/s}$ dai diagramma di pag.13, trascurando l'effetto dell'umidità relativa dell'aria, si nota che l'ambiente è leggermente "freddo". Per eliminare questa sensazione si può aumentare la temperatura superficiale della parete vetrata (vetri doppi), aumentare la t_a o agire ancora sulle altre variabili.