



INDICE

1. Benessere Termoigrometrico
2. Termoregolazione del corpo umano
3. Equazione di bilancio dell'energia
4. Termini dell'equazione
5. Variabili che influenzano l'equazione di benessere
6. Equazione del benessere di Fanger
7. Il benessere secondo ASHRAE
8. Indici di benessere in ambienti moderati
9. Fattori di discomfort

1. Benessere Termoigrometrico

Per **benessere termoigrometrico** si intende la sensazione di *soddisfazione che le persone provano all'interno di un ambiente circa la sensazione termica (sentire caldo o freddo)*; in modo simile si parla di *benessere ambientale acustico, visivo e olfattivo*. In condizioni normali, il benessere termoigrometrico delle persone dipende da sei *grandezze*, **quattro condizioni ambientali**:

- *Temperatura dell'aria;*
- *Temperatura media radiante delle superfici che delimitano l'ambiente;*
- *Umidità relativa dell'aria;*
- *Velocità dell'aria;*

due caratterizzanti gli **individui**:

- *Attività fisica svolta;*
- *Resistenza termica dell'abbigliamento.*

È opportuno precisare che "condizioni di benessere" possono essere ottenute con diverse combinazioni di queste grandezze.

2. Termoregolazione del Corpo Umano

Il corpo umano è un sistema aperto, non chiuso, che si può ritenere funzioni come un edificio: produce calore come se fosse una caldaia, ha un involucro che sono i vestiti, e come un edificio perde vapore, con una continua emanazione di vapore dall'esterno all'interno, così fa a anche il corpo umano tramite la sudorazione, quindi con una perdita di calore latente.

Come noto, il corpo umano funziona correttamente solo in un intervallo di temperatura centrato attorno ai **37°**.

Per mantenere questa temperatura pressoché costante, l'uomo possiede un sistema di "termoregolazione" nell'ipotalamo che, sulla base degli stimoli provenienti dai termoricettori posti sulla pelle, mette in azione strategie compensatrici.

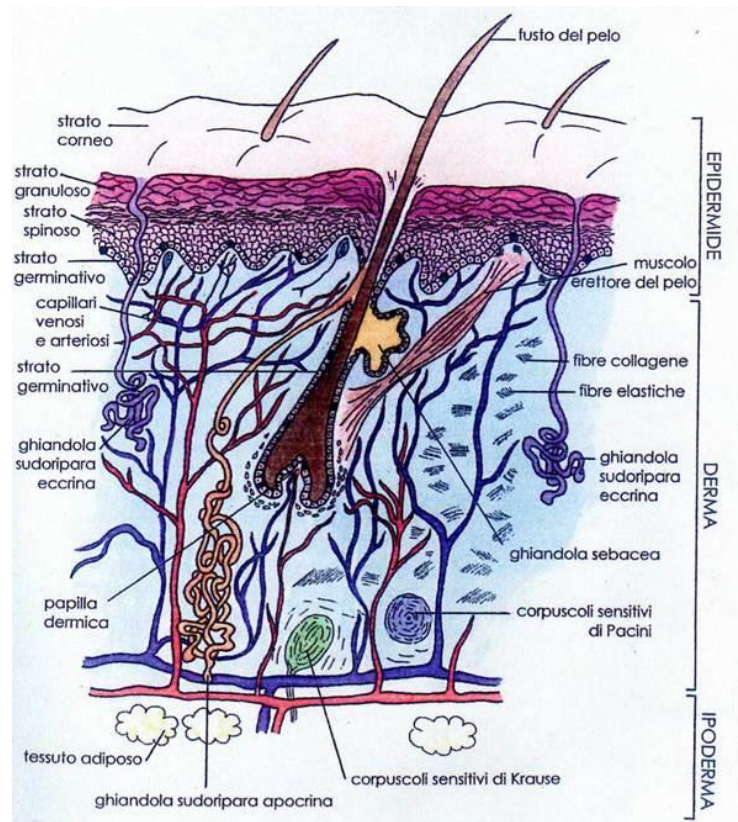


Figura 1 – Sensori cutanei

Dal punto di vista energetico, il corpo converte l'energia potenziale chimica (*tramite processi chimici che trasformano le sostanze reagenti, cibi + ossigeno, in altre sostanze, cataboliti + anidride carbonica*) in energia meccanica ed in calore. La potenza energetica **M** messa in gioco è detta **metabolismo** (es. una persona normale in condizioni di riposo, $M \approx 100 [W]$, mentre in condizioni di esercizio fisico intenso può arrivare anche a $1000 [W]$).

I meccanismi adottati dal corpo umano per controllare la temperatura sono svariati, per evitare un **decremento**:

- Può **ridurre** il calore disperso verso l'esterno, diminuendo la *temperatura della superficie corporea t_s* con una **vasocostrizione** periferica della circolazione sanguigna;
- Può **aumentare M** modificando il **comportamento** (attività fisica, cambiando abbigliamento) oppure tramite un **tremore incontrollato** (brividi).

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

- Può **aumentare** il calore disperso verso l'esterno con un meccanismo opposto a quello precedente, cioè con una **vasodilatazione** della circolazione sanguigna periferica.

- Oppure tramite il **sudore**, che evapora a spese del flusso termico $E_t = g_t \cdot r$ (dove r = calore di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura corporea e g_t = portata di vapore).

In generale si parla di **benessere termoigrometrico** solo quando questi meccanismi fisiologici di termoregolazione NON intervengono.

3. Equazione di Bilancio dell'Energia

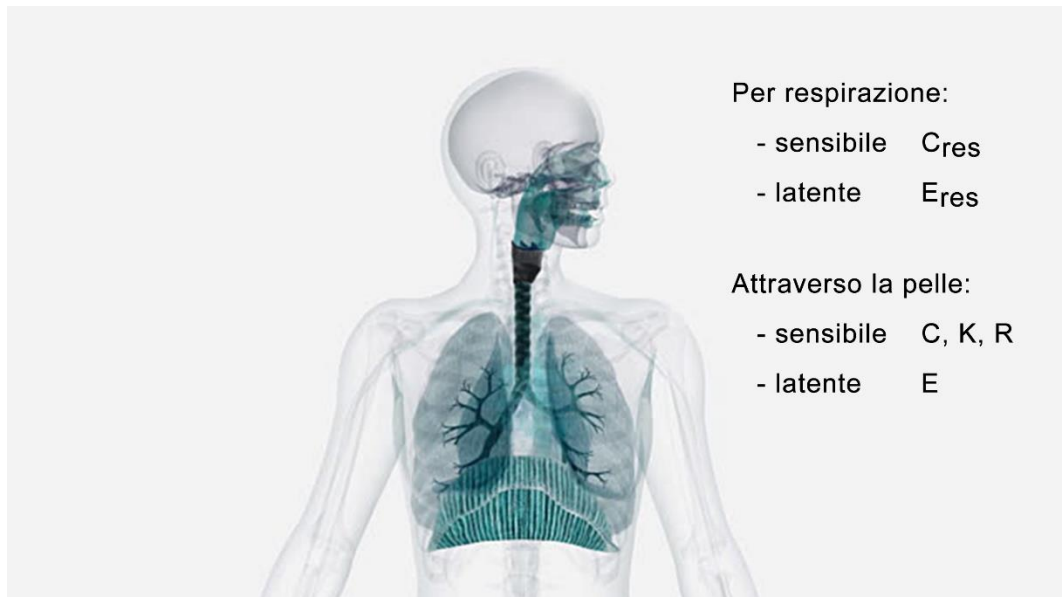


Figura 2 – Bilancio dell'energia

Il corpo umano può essere considerato come un sistema termodinamico, il cui **bilancio dell'energia** è:

$$S = M - W - E_{res} - C_{res} - E - C - R - K$$

Al primo membro, **S** dovrebbe essere nullo se il bilancio è chiuso alla pari. Invece se **S** non è nullo, allora l'organismo sta riscaldandosi oppure si sta raffreddando.

Quindi useremo l'equazione:

$$0 = M - W - E_{res} - C_{res} - E - C - R - K$$

Dove:

- **M = potenza sviluppata per attività metabolica**; è il calore che si genera all'interno del nostro corpo a seguito dei processi biochimici che ci mantengono in vita (W).
- **W = potenza meccanica dissipata per attività lavorativa**; viene dissipata erogando del lavoro meccanico, (W).
Per 1 Watt che erogo di potenza meccanica, il metabolismo cresce di circa 4 Watt. Il rendimento del nostro corpo umano non supera il 25%;

è un motore termico a basso rendimento. Quindi al crescere dell'attività fisica, cresce la quantità di calore di cui il corpo umano è dotato e che deve perdere.

Gli altri termini sono vere e proprie perdite di calore che se ne vanno con altri meccanismi:

- E_{res} = **Potenza termica per evaporazione nella respirazione**, (W). Quando inspiro l'aria, questa non è satura di umidità, mentre quando la espiro, l'umidità relativa è sempre il 100%. Quindi nella respirazione vi è una perdita di umidità relativa (tra il 20 e 30 %) e una conseguente perdita di potenza termica.
- C_{res} = **Potenza termica scambiata per convezione**, (W).
- E = **Potenza termica che se ne va per evaporazione nella traspirazione**, attraverso la pelle se ne va con un calore latente E , dato dal fatto che l'acqua evapora, (W). Ci sono vari meccanismi di evaporazione:
 - *Meccanismo sub-cutaneo* (perspirazione): il liquido si trasforma in vapore sotto la pelle, che rimane asciutta. *Evaporazione a bulbo asciutto*.
 - *Evaporazione esterna alla cute*: quando c'è maggior caldo, le ghiandole sudoripare emettono del liquido all'esterno della pelle che viene ricoperta da un film di sudore che evapora, raffreddando la superficie. *Evaporazione a bulbo bagnato*.
- C = **Potenza termica scambiata per convezione**, (W). Come succede negli edifici, anche nella respirazione se l'aria che è entra è fredda e l'aria che esce è calda, ho un salto di entalpia.
- R = **Potenza termica scambiata per irraggiamento**, (W)
- K = **Potenza termica scambiata per conduzione**, (W)

C e R si sviluppano sulla pelle nuda, mentre la K avviene mediante i vestiti che ricoprono la pelle umana. Di solito la pelle nuda, che scambia calore con l'ambiente è tra il 20 e 30 %.

La condizione necessaria ma non sufficiente per avere le **condizioni di comfort** vi sono quando l'organismo tende a rimanere in equilibrio omeotermo ($S=0$), dunque quando:

- la potenza ceduta all'ambiente è uguale alla potenza generata dai processi metabolici
- la temperatura interna all'organismo si assesta sui 37° C

Non sono sufficienti perché le condizioni possono essere raggiunte mediante attività fisica, che non viene considerata come *comfort*.

Bisogna distinguere gli ambienti gli **ambienti temici**:

- Negli **ambienti moderati** il bilancio (dell'energia) è raggiunto sempre, grazie ai meccanismi di termoregolazione. In queste condizioni non ci sono pericoli per la salute. *Regime stazionario*
- Negli **ambienti severi**, invece, il bilancio non si riesce a chiudere; l'organismo, pur attuando tutti i meccanismi di termoregolazione non

riesce a chiudere il bilancio. Quindi ci sono dei pericoli con la salute (colpi di calore in ambiente caldo e assideramento in ambiente freddo). *Regime transitorio*

Gli edifici che progettiamo sono tutti ambienti moderati, in grado di dare un livello di *comfort* accettabile a chi ne usufruisce, senza pericoli per la salute.

4. Termini dell'equazione

Attività metabolica (M)

L'attività metabolica dell'organismo si divide in:

- Attività metabolica basale, c'è sempre e rappresenta il consumo di energia per mantenere le condizioni vitali (respirazione, circolazione del sangue, processi digestivi ecc.); varia in funzione di sesso, età, massa, altezza ... dell'individuo, ma vi è un valore medio (**met**) dell'attività metabolica a riposo.
- **Attività metabolica a riposo** comprende quella basale e le funzioni digestive e posturali, senza attività muscolare.
- **Attività metabolica lavorativa** è legata al lavoro compiuto ed al rendimento muscolare nell'attività lavorativa.

Il metabolismo energetico viene espresso solitamente con l'unità incoerente **met**: $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$.

E' un valore medio e rappresenta l'attività metabolica di un individuo medio a riposo, e viene misurato in due modi:

- attraverso *misura diretta*, quindi basandosi sul consumo di ossigeno.
- attraverso *misura indiretta*, quindi basandosi sui valori tabellati in funzione dell'attività.

Tipo di attività	Valore metabolico [W/m2]	Valore metabolico [met]
Nessuna attività (dormire)	34	0.6
Nessuna attività (posizione sdraiata)	46	0.8
Nessuna attività (posizione seduta, rilassata)	58	1.0
Attività leggera sedentaria (ufficio, casa, scuola,...)	70	1.2
Attività leggera in piedi (compere, lavoro leggero)	93	1.6
Attività media in piedi (lavoro domestico, a macchina)	116	2.0
Attività media in piedi (camminare a 3 km/h)	140	2.4
Attività pesante (fare ginnastica)	174	3.0
Attività pesante (ballare)	290	5.0

Figura 3 – Tabella valori di Met

L' **Area della superficie corporea** (A_b) è data dalla formula di Du Bois:

$$A_b = 0,202 \cdot m_b x^{0,425} \cdot h_b x^{0,725}$$

Dove:

- m_b = massa corporea (kg)
- h_b = altezza (m)

L'area della superficie corporea di un uomo standard, con massa pari a 70 kg e altezza pari a 1,8 m, è di $1,8 \text{ m}^2$.

Potenza meccanica (W)

L'energia potenziale chimica degli alimenti si trasforma in:

- **energia termica** (necessaria alla termoregolazione dell'organismo)
- **energia elettrica** (necessaria alla trasmissione degli impulsi nervosi)
- **energia meccanica** (convertita nell'attività muscolare); il rapporto tra la potenza meccanica W e l'attività metabolica M viene definito rendimento meccanico $\eta=W/M$; il valore del rendimento meccanico è normalmente molto basso (<0.20) e leggermente crescente con la potenza meccanica W .
- **energia chimica** (accumulata dall'organismo come riserva energetica)

Bisogna anche considerare che potrebbero esserci altri apporti di energia oltre a quella che noi bruciamo con il metabolismo, potrebbe esserci del *calore radiante* derivante dal sole. La potenza radiante ricevuta dal sole potrebbe essere maggiore di quella che viene dissipata dal nostro organismo. Quindi si ha calore da smaltire: nell'equazione del bilancio dell'energia, R diventerebbe quindi negativo.

Flusso termico convettivo (C) e radiativo (R)

Derivano dalla perdita di calore della pelle umana a rispetto all'ambiente. Bisogna considerare che gli abiti non sono a diretto contatto con la pelle umana ma è presente un cuscinetto d'aria (di spessore variabile) tra pelle e vestiti. Vi è quindi un primo scambio termico tra pelle e vestiti, per convezione, poi il calore passa, per convezione, attraverso lo strato dei vestiti, ed infine la superficie esterna dei vestiti cede calore all'ambiente mediante irraggiamento e convezione.

Si ha quindi:

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

$$R = A_b \cdot f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - t_{mr})$$

Dove:

- h_c è il **coefficiente di convezione termica**, (W/m^2K).
- h_r è il **coefficiente di irraggiamento**, (W/m^2K).

- f_{cl} è il **fattore di vista o fattore di forma**, indica quanto siamo esposti alla temperatura radiante dei vestiti.

Per calcolare separatamente i due termini C ed R , mi servono un semplice termometro, per sapere la temperatura dell'aria (t_a) ed un globo-termometro per la temperatura radiante (t_{cl}).

Combinando le due equazioni precedenti si ottiene:

$$C + R = A_b \cdot f_{cl} \cdot (h_c + h_r) \cdot (t_{cl} - t_o)$$

Dove:

- t_{cl} è la **temperatura dei vestiti**.
- t_o è la **temperatura operativa** dell'ambiente, temperatura media pesata è la temperatura dell'aria con riferimento alla componente convettiva, mentre è la temperatura media radiante con riferimento alla componente radiante. Non è la temperatura dell'aria (t_a).

Per definire l'**unità di resistenza termica del vestiario**, si utilizza il "**clo**", con $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Questa è la resistenza termica tipica di una persona vestita con vestiario invernale (es: pantaloni, giacca e camicia per un uomo).

Sono tabellati tutti i valori di "**clo**" dei vestiti:

Capo di abbigliamento	I_{cl} (clo)
Maglieria intima	
Slip	0.03
Maglia a maniche corte	0.09
Maglia a maniche lunghe	0.12
Camicie	
Leggera, a maniche corte	0.15
Leggera, a maniche lunghe	0.20
Di flanella, a maniche lunghe	0.30
Pantaloni	
Corti	0.06
Leggeri	0.20
Normali	0.25
Abiti - gonne	
Gonna leggera (estiva)	0.15
Gonna pesante (invernale)	0.25
Abito leggero, a maniche corte	0.20
Abito invernale, a maniche lunghe	0.40
Maglioni	
Gilet	0.12
Maglione leggero	0.20
Maglione pesante	0.35
Giacche	
Giacca leggera (estiva)	0.25
Giacca pesante (invernale)	0.35
Accessori	
Calzini	0.02
Calzini pesanti lunghi	0.10
Calze di nylon	0.03
Scarpe (suola sottile)	0.02
Scarpe (suola spessa)	0.04

Figura 4 – Tabella valori di Clo (1)

Abbigliamento	I _{cl} (clo)	I _{cl} (m ² C/W)
Da lavoro		
Mutande, tuta da lavoro, calzini, scarpe	0.70	0.110
Mutande, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0.75	0.115
Mutande, camicia, tuta da lavoro, calzini, scarpe	0.80	0.125
Mutande, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	0.85	0.135
Mutande, camicia, pantaloni, grembiule, calzini, scarpe	0.90	0.140
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1.00	0.155
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, tuta, calzini, scarpe	1.10	0.170
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante, tuta, calzini, scarpe	1.85	0.285
Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, giacca termica e pantaloni, giacca termica per l'esterno e pantaloni, calzini, scarpe	2.20	0.340
Giornaliero		
Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri, sandali	0.30	0.050
Slip, camicia a maniche corte, gonna, calze, sandali	0.55	0.080
Mutande, camicia, pantaloni leggeri, calzini, scarpe	0.60	0.095
Slip, sottoveste, calze, abito, scarpe	0.70	0.105
Slip, camicia, gonna, maglione a girocollo, calzettini spessi al ginocchio, scarpe	0.90	0.140
Slip, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1.00	0.155
Slip, blusa, gonna lunga, giacca, calze, scarpe	1.10	0.170
Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, camicia, pantaloni, maglione con scollo a V, giacca, calzini, scarpe	1.30	0.200
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, gilet, giacca, cappotto, calzini, scarpe	1.50	0.230

Figura 5 – Tabella valori di Clo (2)

I valori di *clo* e *met* determinano il livello di comfort di una persona all'interno di un ambiente.

Flusso Termico (E)

Parte evaporativa è fortemente influenzata dall'umidità che c'è dentro gli ambienti. E' quella che mi spiega perché al variare dell'umidità all'interno dell'ambiente, cambiano così fortemente le condizioni di comfort.

Come visto, la parte evaporativa avviene con due modalità diverse:

- Evaporazione a *pelle asciutta*, che si può ritenere quasi trascurabile.
- Evaporazione a *pelle bagnata*, che è la dominante.

La **Potenza evaporativa totale (E)** è data dalla relazione:

$$E = w \cdot \frac{(p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,t}}$$

Dove:

- w è la percentuale di pelle bagnata, non conta lo spessore del liquido sulla pelle ma la superficie di pelle bagnata.
- $p_{sk,s}$ è la pressione di saturazione del vapore d'acqua alla temperatura della pelle (Pa).
- p_a è la pressione parziale del vapore d'acqua nell'aria (Pa).
Maggiore è la *differenza della perdita di pressione parziale* del vapore ($p_{sk,s} - p_a$), maggiore è la portata d'acqua che evapora, maggiore sarà la potenza termica che questa portata d'acqua che evapora porta via.
- $R_{e,t}$ è la resistenza totale degli abiti allo scambio termico evaporativo, ($m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$). E' l'equivalente della resistenza alla diffusione del vapore delle pareti multistrato dell'edificio; anche i vestiti che abbiamo

addosso esplicano una resistenza alla diffusione del vapore (piccola con i vestiti traspiranti, grande con i vestiti impermeabili)

La **Potenza evaporativa totale** (E) quindi dipende da:

- come siamo vestiti.
- quanto siamo sudati.
- condizioni ambientali, perché se l'aria dell'ambiente è già satura d'acqua, il nostro organismo può sudare quanto vuole ma il calore non se ne va, quindi la pelle rimane bagnata ma non ci dà la possibilità di raffreddarci.

Flusso Termico Cres e Eres

Sono legati alla respirazione: quando l'aria entra ha una temperatura di circa 20° C e una umidità relativa di circa il 50%, mentre quando l'aria esce ha circa 36° C e un'umidità relativa di circa il 100%.

La perdita di calore latente, dovuta alla differenza di entalpia tra portata di aria espirata ed inspirata, è data da:

$$C_{res} = m_{res} \cdot c_{p,a} (t_{es} - t_a)$$

$$E_{res} = m_{res} \cdot \Delta h_w (x_{es} - x_a)$$

Dove:

- m_{res} è la **massa d'aria respirata**.
- $c_{p,a}$ è il **calore specifico a pressione costante dell'aria**.
- $(t_{es} - t_a)$ è la **differenza** tra la **temperatura dell'aria espirata** e la **temperatura dell'aria inspirata**.
- Δh_w è il **calore latente di vaporizzazione**, salto di entalpia tra acqua liquida e vapore.
- $(x_{es} - x_a)$ è la **differenza** tra il **titolo dell'aria espirata** e il **titolo dell'aria inspirata**.
Il *titolo* è il grado di vapore per kg di aria secca, che sta in ordinata nel diagramma psicrometrico.

E_{res} è il dominante tra i due a meno che l'aria che espiriamo abbia lo stesso titolo di quella che inspiriamo, e quindi $E_{res} = 0$ e l'unica perdita che ci può essere è quella di calore sensibile C_{res} .

La massa d'aria che respiriamo (m_{res}) non è costante, a riposo si respirano circa 12/20 litri/min mentre sotto sforzo questa aumenta di 5 volte.

Al crescere del valore di "met" variano anche i valori di C_{res} e E_{res} .

5. Variabili che influenzano l'equazione di benessere

$$S = f(M, I_{cl}, t_a, t_{mr}, v_a, U. R.)$$

I parametri che, influenzando gli scambi termici tra individuo e ambiente, determinando le condizioni di benessere, sono tipicamente 6:

4 *parametri ambientali*:

- la **temperatura dell'aria** (t_a), che influenza gli scambi termici convettivi.
- la **temperatura media radiante** (t_{mr}), che influenza gli scambi termici irradianti.
- la **velocità relativa dell'aria** (v_a), che influenza gli scambi termici convettivi.
- l'**umidità relativa dell'aria** ($U. R.$), che influenza lo scambio evaporativo dal corpo.

2 *parametri individuali*:

- il **dispendio metabolico** (M), dovuto all'attività lavorativa svolta.
- la **resistenza termica conduttiva ed evaporativa del vestiario** (I_{cl}).

All'aumentare del *Metabolismo*, dell'*Umidità Relativa*, della *Temperatura dell'aria*, della *Temperatura media radiante* e della *resistenza termica conduttiva ed evaporativa del vestiario*, aumenta in maniera positiva il valore di S e l'individuo tende ad avere caldo.

Solo l'aumento della *velocità dell'aria* aumenta in maniera negativa il valore di S , quindi avendo più fresco.

I **4 parametri ambientali** possono essere controllati mediante un **edificio attivo**, quindi con macchinari e tecnologie (impianti) che agiscono esclusivamente sulle quattro variabili.

I **2 parametri individuali** non permettono al progettista un grosso controllo, sono indipendenti ed **espressi dagli occupanti** dell'edificio.

6. Equazione del benessere di Fanger

Se l'equazione è chiusa e quindi $S = 0$, allora vi è comfort ambientale. Il campione su cui aveva fatto gli studi era un campione di 1600 studenti ventenni nordici, a cui *Fanger* aveva messo in luce, in condizioni di benessere, la dipendenza della temperatura della pelle e della sudorazione dall'attività metabolica. Quindi, rispetto alla precedente conoscenze, si è scoperta l'interdipendenza tra tutte le variabili ($M, I_{cl}, t_a, t_{mr}, v_a, U. R.$), che porta a definire le condizioni di comfort degli ambienti.

Fanger aveva quindi utilizzato una base non assortita a livello del campionario umano ma con un metodo che è ancora oggi ritenuto valido.

Si può risolvere l'equazione di *Fanger* per una coppia di variabili, tenendo costanti le altre, ottenendo dei grafici, pubblicati dallo stesso *Fanger*, che mettono in luce l'interdipendenza tra le sei variabili del problema.

Questo primo diagramma permette di far variare la *temperatura dell'aria* (t_a), che qui viene assunta uguale alla *temperatura radiante* (t_{mr}), e quindi alla *temperatura operativa*, presente in ascissa nel diagramma. In ordinata invece si trova la *temperatura di bulbo bagnato* (t_b), legata all'umidità relativa (*U. R.*).

Gli altri parametri che vengono fissati sono:

- $M = 1 \text{ met}$
- $I_{cl} = 0.5 \text{ clo}$ (con vestiti estivi)

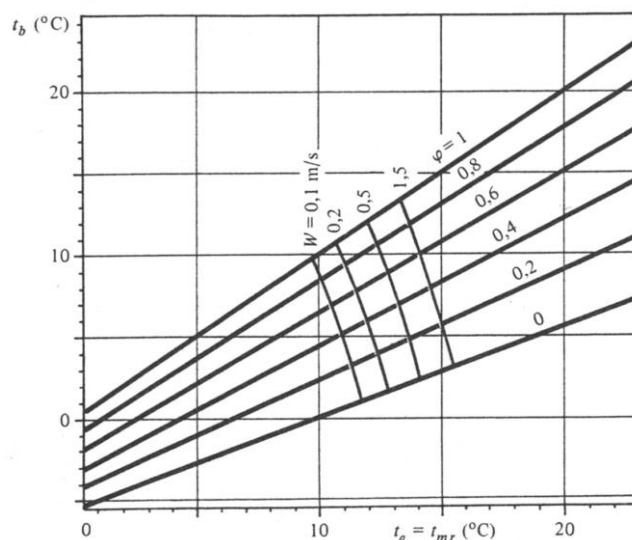


Figura 6 – Diagramma di Fanger (*U. R.*, $t_a = t_{mr}$, t_b)

Si può notare che le curve del diagramma, ad una certa temperatura radiante, fanno variare la temperatura del bulbo bagnato, al crescere dell'umidità relativa.

Quando l'*umidità relativa* è al 100%, $t_a = t_b$, in quanto non c'è più raffreddamento evaporativo; mentre al diminuire della umidità relativa, cala la temperatura di bulbo bagnato.

In queste condizioni, *il comfort varia in funzione della velocità relativa dell'aria* (v_a):

- se per esempio $v_a < 0.1 \text{ m/s}$, quindi man mano l'umidità relativa scende, minore diventa t_b e maggiore diventa t_a (che parte da 23 e arriva a 25° C).
- se aumenta la velocità dell'aria, allora deve aumentare anche la sua temperatura.

Nel secondo diagramma si valutano le condizioni di benessere al variare della velocità dell'aria (v_a), della temperatura dell'aria (t_a) e della temperatura media radiante (t_{mr}).

Inoltre, vengono fissati i seguenti parametri:

- $M = 1 \text{ met}$
- $I_{cl} = 0.5 \text{ clo}$ (con vestiti estivi)
- $U.R. = 50\%$

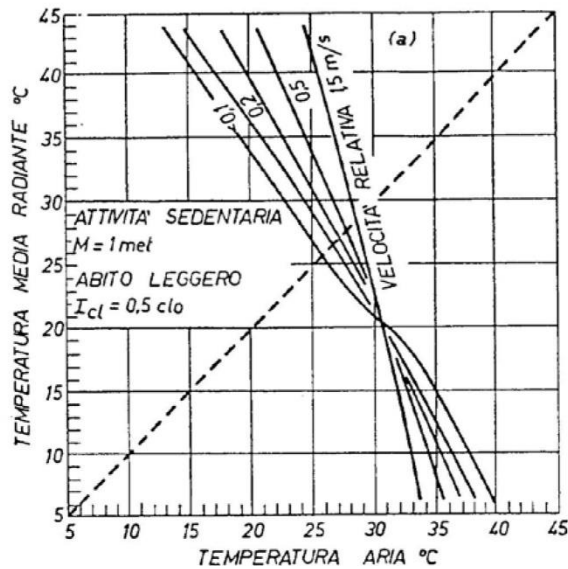


Figura 7 – Diagramma di Fanger (v_a , t_a , t_{mr})

Ognuna delle linee di equilibrio è per una diversa velocità dell'aria. Si può vedere l'interdipendenza tra *temperatura dell'aria* (t_a) e *temperatura radiante* (t_{mr}): per mantenere il **comfort**, al calare della temperatura dell'aria, deve aumentare la temperatura radiante e viceversa. Al crescere della velocità dell'aria, diventa più dominante la temperatura dell'aria. Il significato è che, maggiore è la velocità dell'aria, meno sento l'irraggiamento, viceversa l'irraggiamento è molto rilevante quando l'aria è ferma.

Il merito di *Fanger* è stato quello di mettere tutte queste conoscenze note in uno schema logico.

Nel terzo diagramma vi è la correlazione tra velocità dell'aria (v_a), sull'asse delle ordinate e temperatura dell'aria, considerata uguale alla temperatura radiante ($t_a = t_{mr}$), sull'asse delle ascisse.

Inoltre, vengono fissati i seguenti parametri:

- $I_{cl} = 0.5 \text{ clo}$ (con vestiti estivi)
- $U.R. = 50\%$

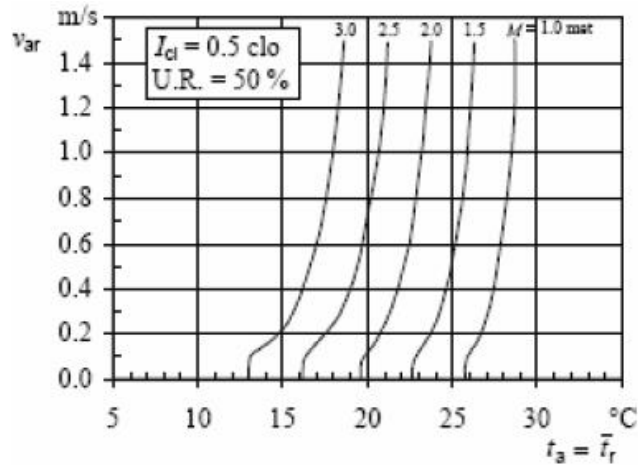


Figura 8 – Diagramma di Fanger ($v_a, t_a = t_{mr}, M$)

Viene fatto variare dunque il *metabolismo* (M), andando verso sinistra nel diagramma viene effettuata un'attività lavorativa sempre più intensa. Le linee verticali sono come al solito luogo di comfort, dove $S = 0$. Si vede che al crescere della *velocità dell'aria*, la sua *temperatura* deve essere più calda, mentre al diminuire della velocità, la sua temperatura deve essere più bassa. Al di sotto di una *velocità dell'aria* $v_a < 0.1$ m/s, la temperatura dell'aria rimane costante, in quanto si ha il fenomeno della **convezione naturale**.

7. Il benessere secondo ASHRAE

La **ASHRAE** (*American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*) ha proiettato il risultati di *Fanger* sul *diagramma psicrometrico*, fissando i seguenti parametri:

- $I_{cl} = 1.0$ clo
- $M = 1.0$ met
- $v_a < 0.1$ m/s

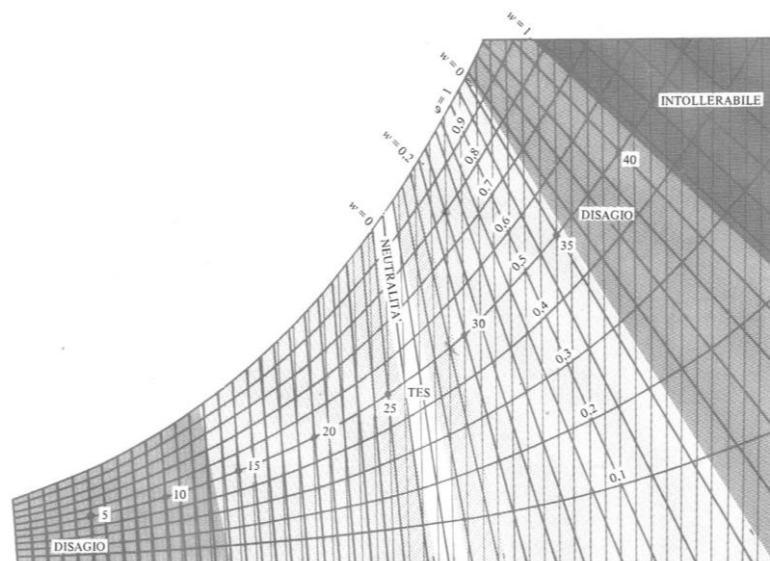


Figura 9 – Diagramma del benessere secondo ASHRAE

Viene definita una *fascia di neutralità*, come la fascia bianca centrale, dove ci sono i punti di comfort.

Sulla parte sinistra del diagramma, vi sono i punti in cui gli individui hanno *freddo*, mentre sulla parte destra vi sono i punti in cui gli individui hanno *caldo*.

Il metodo del diagramma ASHRAE viene quindi colorato a seconda delle variabili indipendenti (in particolare M , I_{cl} e v_a).

In condizioni di comfort, secondo ASHRAE, la **percentuale di pelle sudata** è < 10%, perché viene considerato un fattore di disagio avere un'alta percentuale di pelle sudata, anche se non si ha né caldo né freddo. Questo è dovuto sempre il fatto di aver usato un campione di popolazione nordica, che ritiene un fastidio la sudorazione, in quanto abituata ad un clima freddo.

8. Indici di benessere in ambienti moderati

Per rapportare i parametri fisici analizzati nei capitoli precedenti (*temperatura, pressione parziale del vapore, umidità relativa ecc.*), Fanger ha eseguito dei test su dei soggetti, chiedendo a loro di indicare su una scala numerica il livello di comfort termico. I risultati di questi questionari hanno dato luogo agli indici di sensazione: **PMV** e **PPD**, che non sono più grandezze fisiche ma **grandezze sensoriali**.

- il **PMV** (Voto Medio Previsto) è una scala numerica lineare che ha un valore che può variare tra **-3 e +3** dove, a livello verbale, -3 indica una sensazione di “molto freddo” e +3 rappresenta il “molto caldo”, mentre **0** rappresenta la condizione di **comfort**. In base alla teoria di Fanger si può stimare questo valore attraverso delle formule matematiche, una delle quali lega il PMV al metabolismo (M) ed al carico termico (L), cioè l'attività svolta.

$$PMV = [0,303 * \exp(-0,036 * M) + 0,028] * L$$

VOTO	SENSAZIONE
+3	Molto Caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente Caldo
0	Comfort
-1	Leggermente Freddo
-2	Freddo
-3	Molto Freddo

Scala di Sensazione ASHRAE

Siccome la percezione umana del comfort termico è soggettivo, quando si ha un valore di PMV tendente allo 0, si sarà sempre una percentuale di persone che avranno caldo ed altre che avranno freddo e che quindi si diranno insoddisfatte.

- L'indice **PPD** (percentuale prevista di insoddisfazione) è correlata alla PMV, ottenendo la curva di insoddisfazione in *figura 10*.
 Quando il PMV è uguale 0, si ha un indice di insoddisfazione PPD pari al 5% che può crescere fino al 10% ai limiti dell'intervallo di benessere (+0,50 -0,50) per poi cresce rapidamente al progressivo allontanarsi del PMV dai valori di comfort. Normalmente un sistema intelligente di regolazione del comfort termoisometrico si dice efficiente quando la percentuale di persone insoddisfatte non supera il 10%.

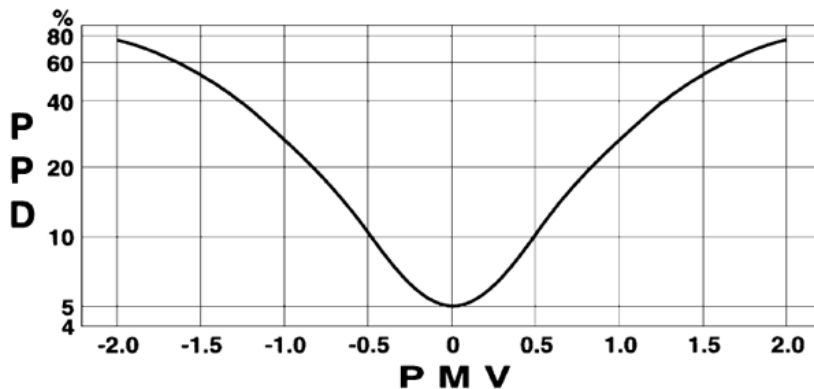


Figura 10 – Curva di insoddisfazione termoisometrica

Il metodo di Fanger ha avuto la sua importanza storica in quanto è stata la prima pubblicazione in materia, tuttavia attualmente si usa il metodo ASHRAE (*UNI EN 7730*). Nella pratica questo metodo si concretizza in un diagramma psicrometrico colorato (*figura 9*), dove la situazione di comfort è data dalla zona di bilancio termico uguale a 0, a destra del quale fa caldo ed a sinistra fa freddo. Tuttavia vengono usati ancora i diagrammi di Fanger (*figura 11*), perché queste mostrano meglio l'interdipendenza tra alcune variabili che concorrono a stabilire lo stato di comfort (es. *il vestiario "clo", la temperatura operativa "°C" ecc..*).

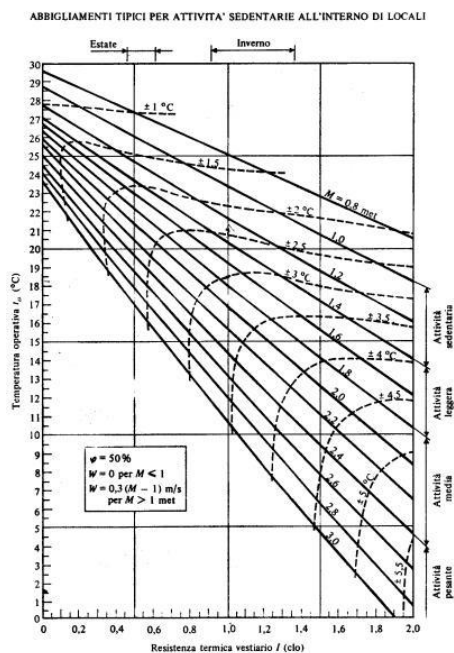


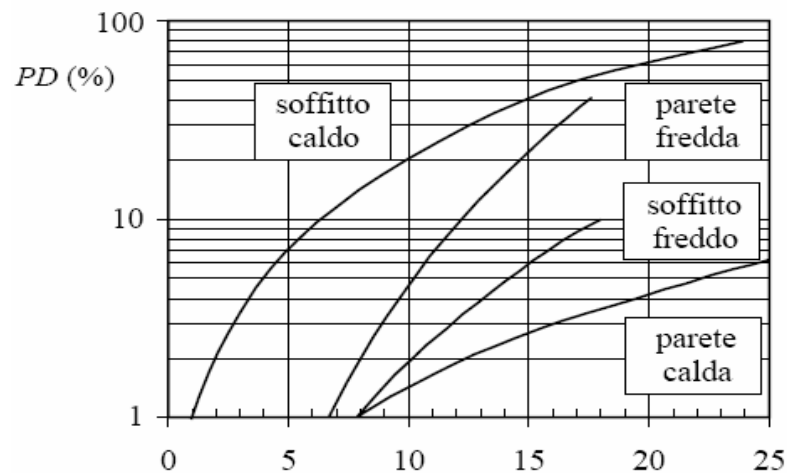
Figura 11 – Diagramma di Fanger

9. Fattori di discomfort

Ci sono dei fattori di discomfort che non sono stati presi in considerazione da Fanger nell'equazione di bilancio e che possono portare a situazioni di ulteriore disagio agli utenti.

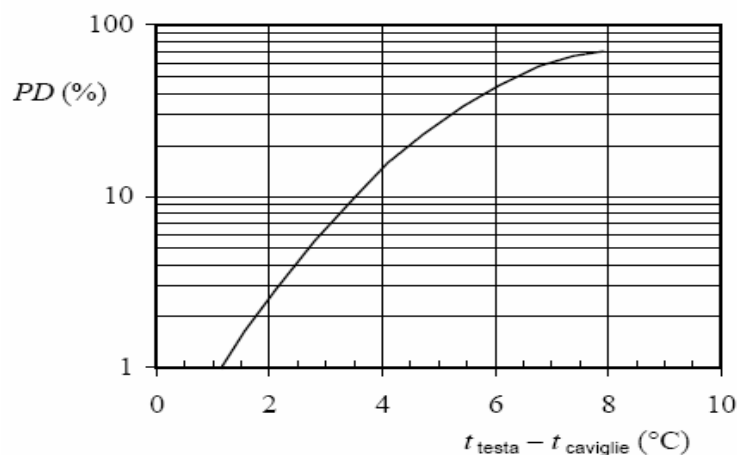
○ **Asimmetria temperatura media radiante**

La percentuale di insoddisfazione cresce all'aumentare della differenza di temperatura tra l'ambiente circostante e le superfici dei locali (*soffitto, parete*). Il caso peggiore è quello del soffitto caldo.



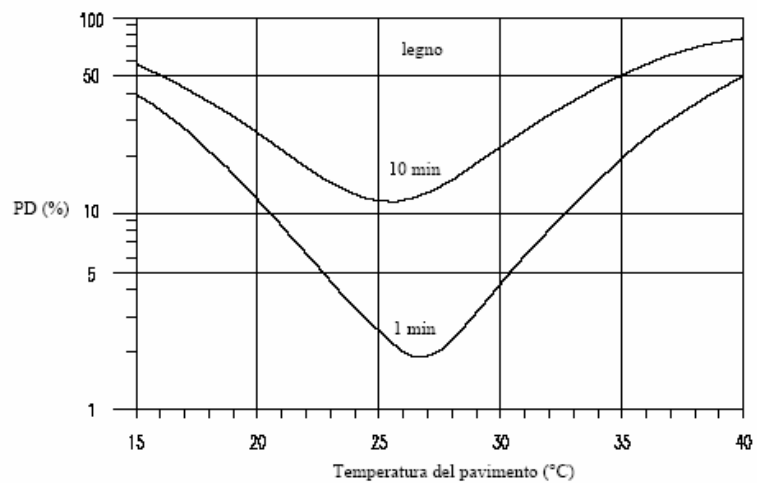
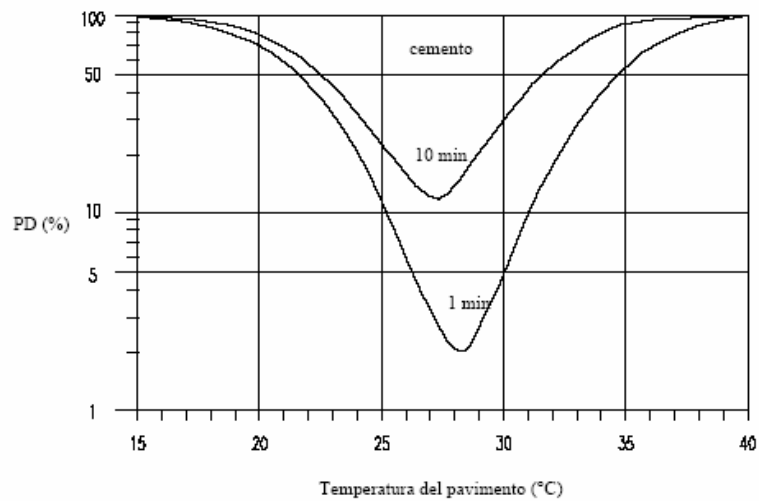
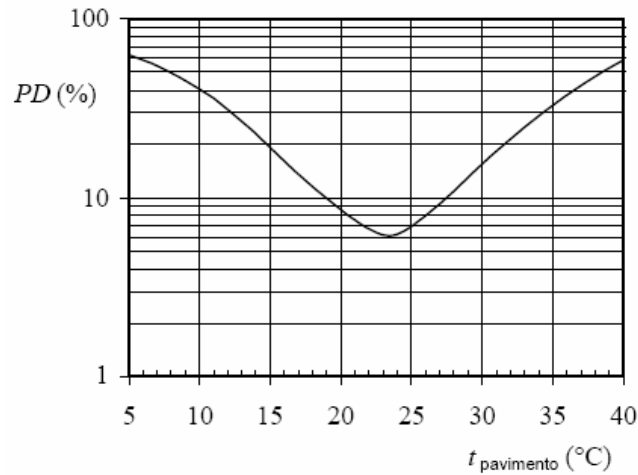
○ **Differenza temperatura testa-caviglie**

La percentuale di insoddisfazione cresce con l'aumentare della differenza di temperatura tra pavimento e soffitto, l'ideale sarebbe avere una temperatura il più omogeneo possibile.



○ **Temperatura di pavimento**

Un altro fattore di discomfort è il pavimento troppo freddo, che dipende principalmente dal materiale di cui è costituito ma anche dal tempo di esposizione alla superficie. A parità di temperatura, i pavimenti in cemento tendono a dare maggiore discomfort rispetto alle pavimentazioni in legno.



○ Variabilità velocità aria

Un ultimo fattore che condiziona il grado di comfort delle persone è la variabilità della velocità dell'aria nel tempo. Non esiste una quantificazione esatta della percentuale di insoddisfatti che produce, però nei sistemi di ventilazione con accensione on/off questo effetto è molto marcato perché l'accelerazione dell'aria avviene in modo improvviso.

