

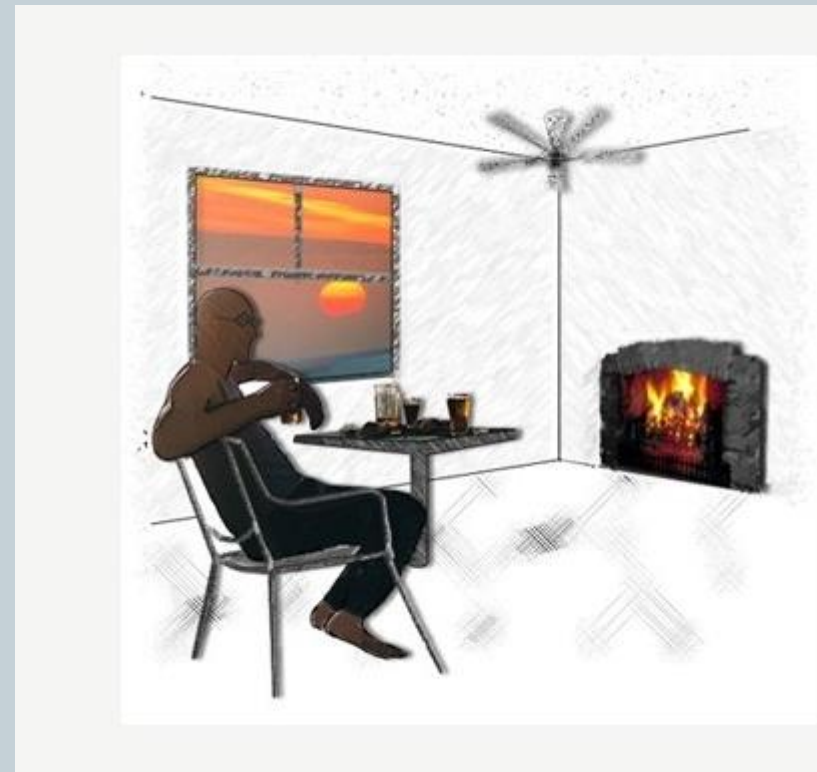
Benessere
Termoigrometrico

Prof. Marina Mistretta

Benessere termico

Il **benessere termico** è definito come lo stato di piena soddisfazione del soggetto nei confronti dell'ambiente termico.

La condizione di "*benessere termico*" viene definita come "quello stato della mente che esprime la soddisfazione verso l'ambiente termico "(ISO 7730).



Benessere termico

Stagione	T aria	UR	Velocità aria
Inverno	19-22°	40-50%	0,01-0,1 m/s
Estate	24-26°	50-60%	0,1-0,2 m/s

Fisiologia

Per analizzare le condizioni di benessere un punto di partenza è dato dalla necessità di OMOTERMIA dell'organismo umano cioè dalla necessità di mantenere costante la temperatura del nucleo del corpo a circa 37°C entro il ristretto margine di mezzo grado..

Il mantenimento **dell'omeotermia**, necessaria allo svolgimento delle reazioni chimiche fisiologiche del corpo umano, viene garantito da un opportuno meccanismo di termoregolazione, mediante l'equilibrio di due fattori: **la generazione e la dispersione di calore.**

LA TERMOREGOLAZIONE DEL CORPO UMANO

Generazione e Dispersione di calore.

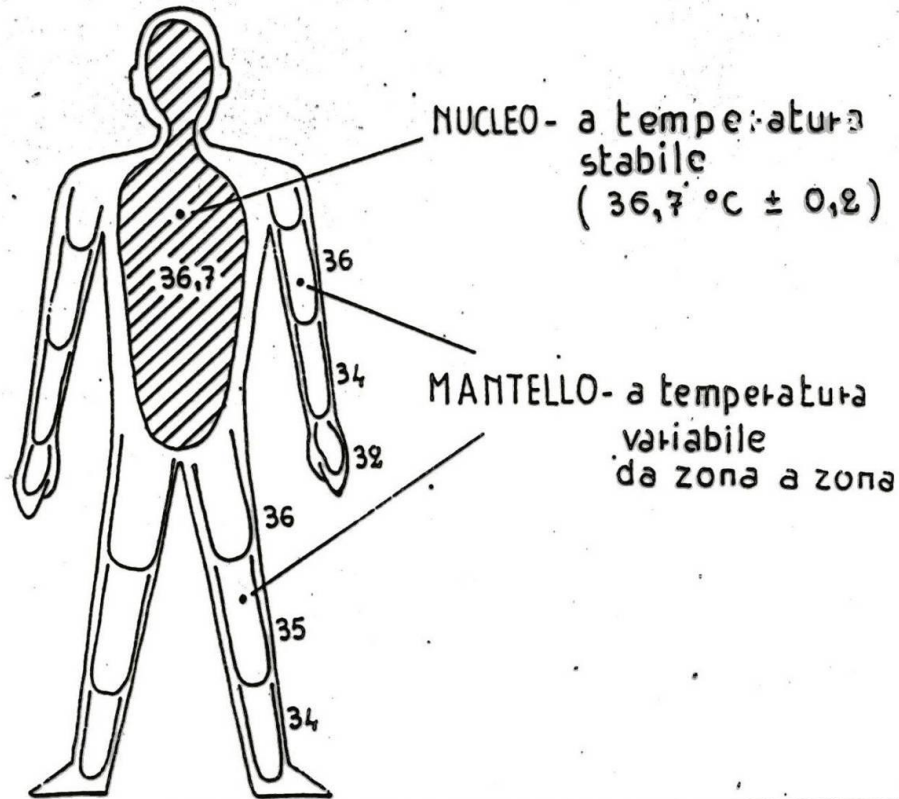
Il primo è conseguenza dei processi chimici subiti dalle sostanze alimentari (metabolismo), mentre il secondo è conseguenza del fatto che la temperatura interna del corpo è superiore a quella dell'ambiente in cui l'uomo vive.



Nucleo e Mantello

LA VARIABILITA' DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE
GARANTISCE LA COSTANZA DI QUELLA DEL NUCLEO

16



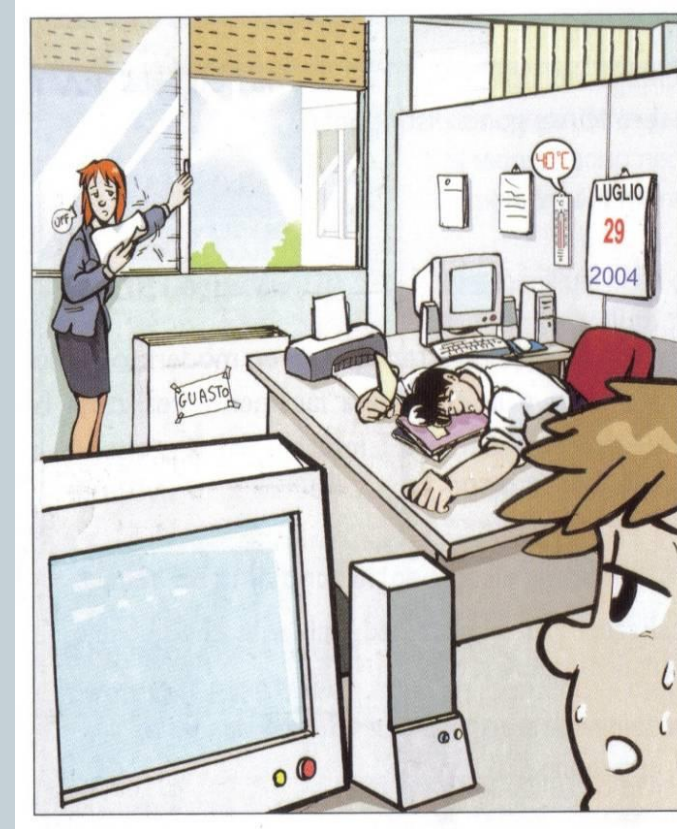
Sistema di termoregolazione

Quando la temperatura dell'ambiente supera quella del corpo, c'è una trasmissione di calore verso il corpo.

Per evitare che la temperatura corporea aumenti:

- Vasodilatazione sanguigna
- Sudorazione

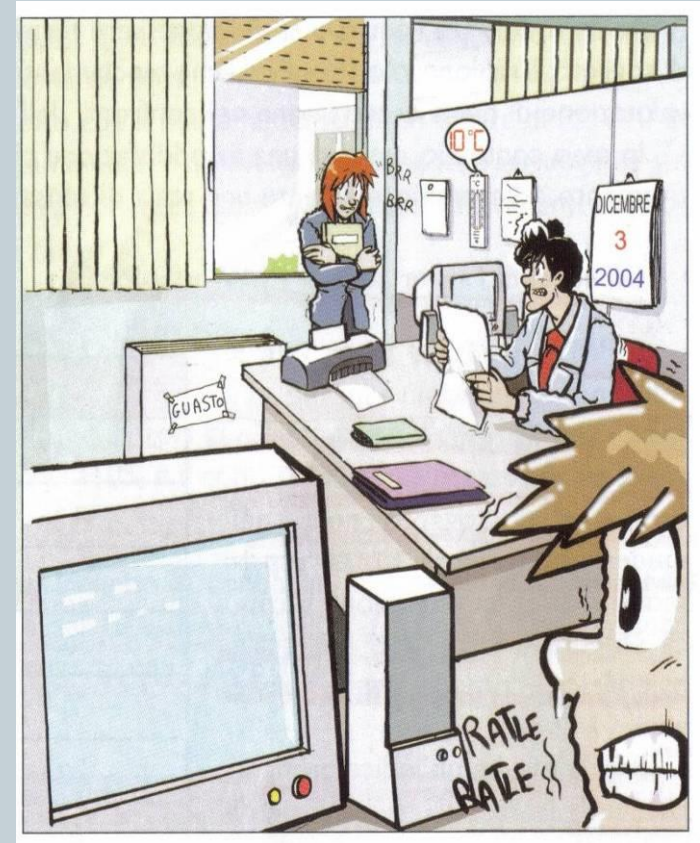
I vasi sanguigni si dilatano.
Aumenta il flusso sanguigno
che provoca la **sudorazione**.



Sistema di regolazione

Al contrario, quando la temperatura esterna è molto inferiore a quella corporea, per evitare che questa diminuisca è necessario ridurre la dispersione di calore verso l'esterno. Come?

- Vasocostrizione sanguigna (Riduzione dell'afflusso di sangue attraverso la pelle).
- Incremento della produzione di calore (aumento attività fisica, cambiando abbigliamento) oppure tremore incontrollato (**brividi**).



L'importanza della termoregolazione

TERMOREGOLAZIONE

- Meccanismo fisiologico di controllo a cui spetta il compito di garantire l'equilibrio termico corporeo. In caso di squilibrio, esso interviene attraverso una serie di azioni fisiologiche

TEMPO DI ACCLIMATAZIONE

- Da caldo a freddo è BREVE – aumento del tasso calorico dovuto ad un cambiamento del metabolismo basale
- Da freddo a caldo è MOLTO LUNGO – apporto di sangue verso i tessuti epiteliali può aumentare fino al 20%; notevole incremento della sudorazione; i processi interni di adattamento sono lenti

$T_{corporea} < 30^{\circ}\text{C}$
Collasso, morte

$T_{corporea} < 35^{\circ}\text{C}$
Congelamento

$T_{sangue} > 40^{\circ}\text{C}$
Colpo di
caldo

$T_{sangue} > 41^{\circ}\text{C}$
Morte
imminente

$T_{sangue} > 42^{\circ}\text{C}$
Scarsa
possibilità di
sopravvivenza



Meccanismi di termoregolazione

Esistono due tipi di termoregolazione

in ambienti freddi



vasocostrizione con diminuzione dell'afflusso di sangue verso la periferia

in ambienti caldi



vasodilatazione con aumento dell'afflusso di sangue alla periferia



EFFETTI

in ambienti freddi



brivido

in ambienti caldi



sudorazione

Ambiente interno versus Ambiente esterno



DIFFERENZE TRA AMBIENTE INTERNO E AMBIENTE INTERNO

VARIABILITÀ DELLE CONDIZIONI MICROCLIMATICHE

In **AMBIENTE INTERNO** si usa fare riferimento (soprattutto per l'inverno) a **CONDIZIONI STAZIONARIE**

In **AMBIENTE ESTERNO** NON si può prescindere dalla **VARIABILITÀ DELLE GRANDEZZE MICROCLIMATICHE**

TEMPO DI PERMANENZA

(legato alla capacità di raggiungere l'equilibrio termico con l'ambiente circostante)

MOLTO PIÙ LUNGO NEGLI SPAZI INTERNI

(circa 90% in estate e 96% in inverno del tempo totale)

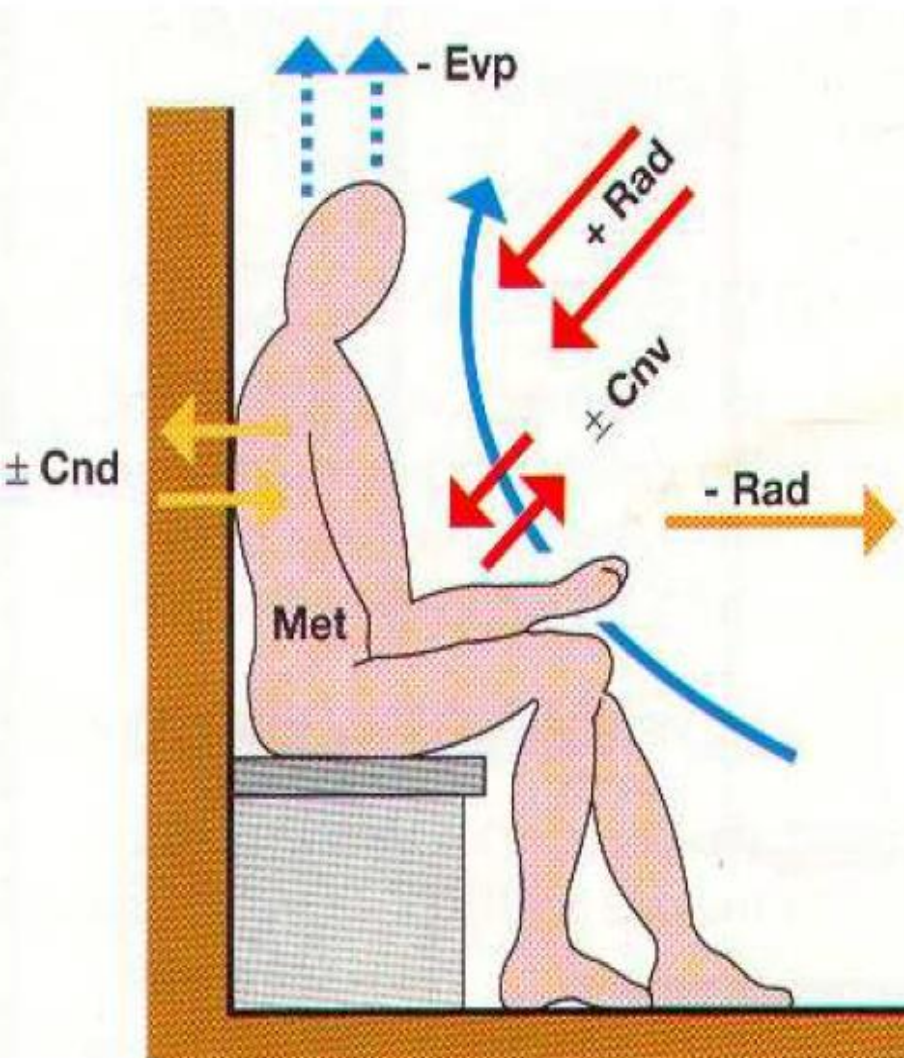
MOLTO MINORE ALL'ESTERNO

(circa 10% in estate e 2-4% in inverno del tempo totale)



MODELLO DI COMFORT DI FANGER

Basi teoriche del modello



$$Met - Evp \pm Cnd \pm Cnv \pm Rad = 0$$

Cnd

- conduzione (contatto con corpi a diversa temperatura)

Cnv

- convezione (con aria più calda o più fredda della pelle)

Rad

- radiazione (dal sole, dal cielo e da corpi a diversa temperatura)

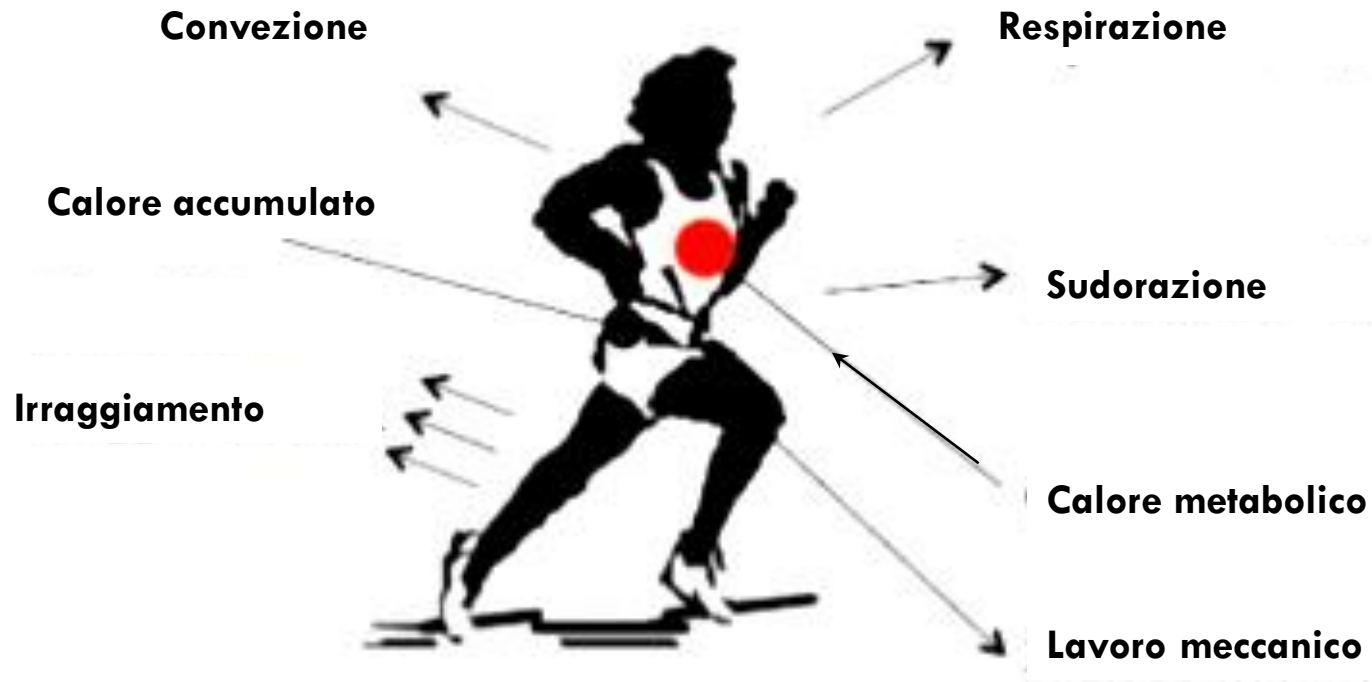
Evp

- evaporazione (sudorazione, traspirazione, respirazione...)

Met

- metabolismo basale e muscolare

SCAMBI TERMICI TRA CORPO E AMBIENTE



Il benessere termoisometrico è garantito quando vi è **equilibrio tra produzione interna di energia termica e gli scambi di energia termica tra corpo e ambiente.**

Viceversa, situazioni di disequilibrio comportano scostamenti delle temperature corporee dai valori ottimali e, quindi, condizioni di disagio termico.

Bilancio Energetico

Lo scambio termico che si instaura tra uomo ed ambiente può essere descritto a partire dal primo principio della termodinamica applicando al sistema corpo umano:

$$C \cdot \Delta T = (M - W) - (Q_{c,res} + Q_{ev,res} + C + R + K + Q_{ev})$$

M = potenza termica prodotta dai processi metabolici

W = potenza meccanica impegnata per compiere lavoro meccanico;

Q_{ev} = potenza termica dispersa attraverso la pelle;

Q_{c,res}+Q_{ev,res} = potenza termica dispersa per respirazione;

K (Q_k) = potenza termica scambiata per conduzione;

C (Q_c) = potenza termica scambiata per convezione;

R (Q_R) = potenza termica scambiata per irraggiamento;

Bilancio Energetico

$$C \cdot \Delta T = (M - W) - (Q_{c,res} + Q_{ev,res} + C + R + K + Q_{ev})$$

- La potenza energetica metabolica e il lavoro meccanico dipendono dall'attività dell'individuo, **M**;
- lo scambio sensibile **Q_{c,res}** per respirazione dipende dall'attività dell'individuo, **M**, e dalla temperatura dell'aria, **t_a**;
- lo scambio latente per respirazione **Q_{ev,res}** dipende dall'attività dell'individuo, **M**, e dall'umidità dell'aria, normalmente espressa in termini di pressione parziale del vapor d'acqua, **p_a**;
- lo scambio sensibile per convezione **C** dipende dalla resistenza termica dell'abbigliamento indossato, **I_{cl}**, dalla temp. degli abiti, **t_{cl}**, dalla temperatura, **t_a**, e dalla velocità dell'aria, **v_a**;

Bilancio Energetico

$$C \cdot \Delta T = (M - W) - (Q_{c,res} + Q_{ev,res} + C + R + K + Q_{ev})$$

- lo scambio sensibile per irraggiamento **R** dipende dalla resistenza termica dell'abbigliamento indossato, **I_{cl}**, dalla temp. degli abiti, **t_{cl}**, e dalla temperatura media radiante, **t_r**;
- lo scambio sensibile per conduzione **K** è in genere trascurabile;
- lo scambio latente attraverso la pelle **Q_{ev}** dipende dalla percentuale di pelle bagnata, dall'umidità dell'aria e dalla resistenza degli abiti.

Bilancio Energetico

Esprimendo i termini dell'equazione di bilancio in funzione delle variabili si ottiene la seguente equazione:

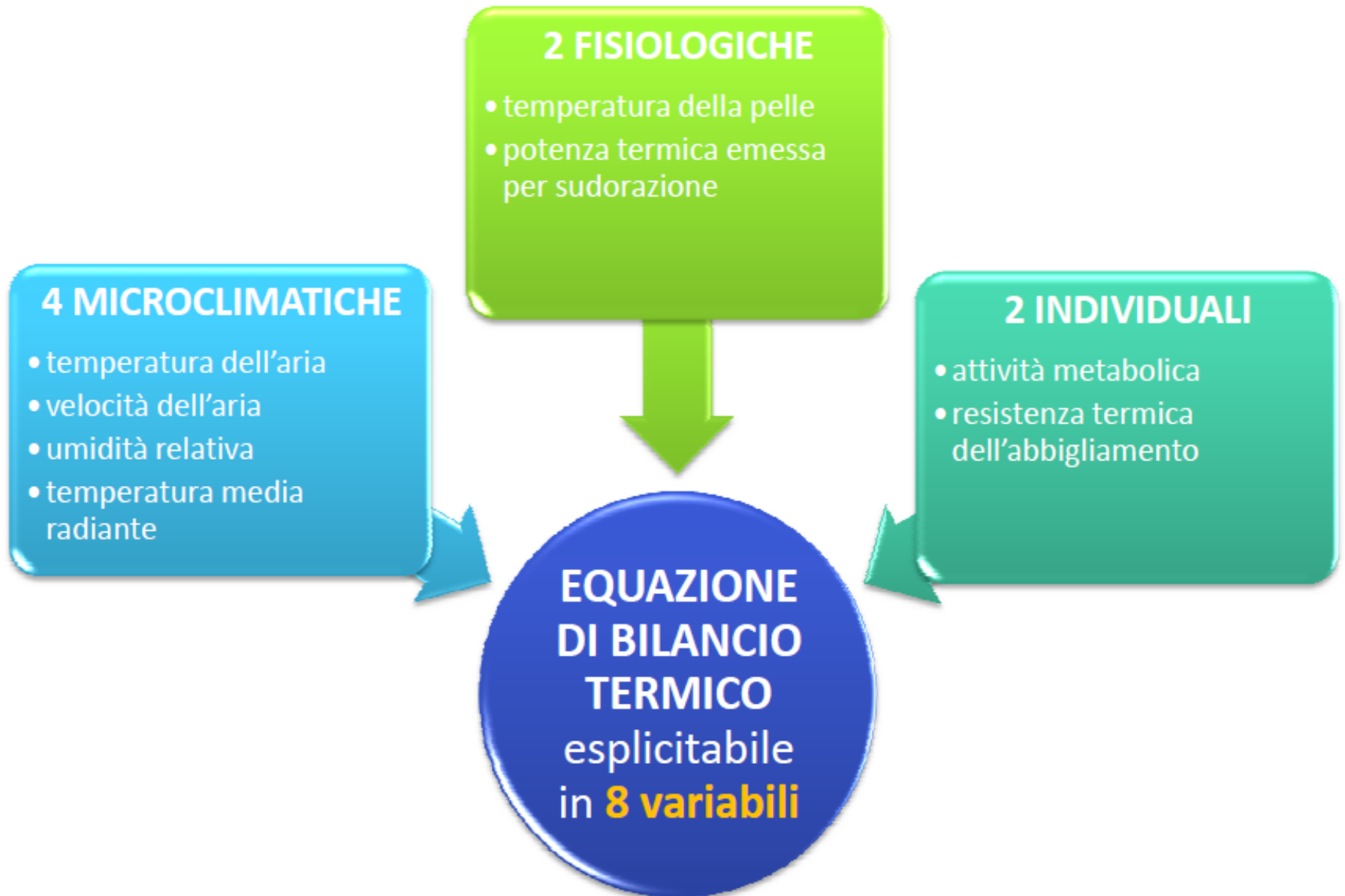
$$C \cdot \Delta T = f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_a, t_{mr}, t_s, Q_{ev})$$

Variabili soggettive **Variabili microclimatiche** **Variabili fisiologiche**

Perché non vi sia accumulo o dispersione di calore dal nucleo del corpo è necessario che la T corporea rimanga costante ($\Delta T=0$), ovvero:

$$f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_a, t_{mr}, t_s, Q_{ev}) = 0$$

Variabili su cui si basa il modello



Bilancio Energetico

$C\Delta T=0$ - viene stabilita la condizione di omeotermia
(*sensazione termicamente neutra*)

$C\Delta T>0$ - la potenza termica in ingresso è maggiore di quella in uscita, con conseguente sensazione di caldo.

$C\Delta T<0$ - al contrario, la potenza termica in ingresso è minore di quella in uscita, con conseguente sensazione di freddo.

Bilancio Energetico

M = Metabolismo energetico = f(attività)

Gli alimenti e le bevande ingeriti dall'uomo vengono trasformati mediante reazioni di ossidazione esoenergetiche, che convertono l'energia chimica dei cibi in energia termica.

- 1) Metabolismo basale ($43\text{W}/\text{m}^2$);
- 2) Attività dell'individuo.

La produzione di M è legata anche alle dimensioni dell'individuo:

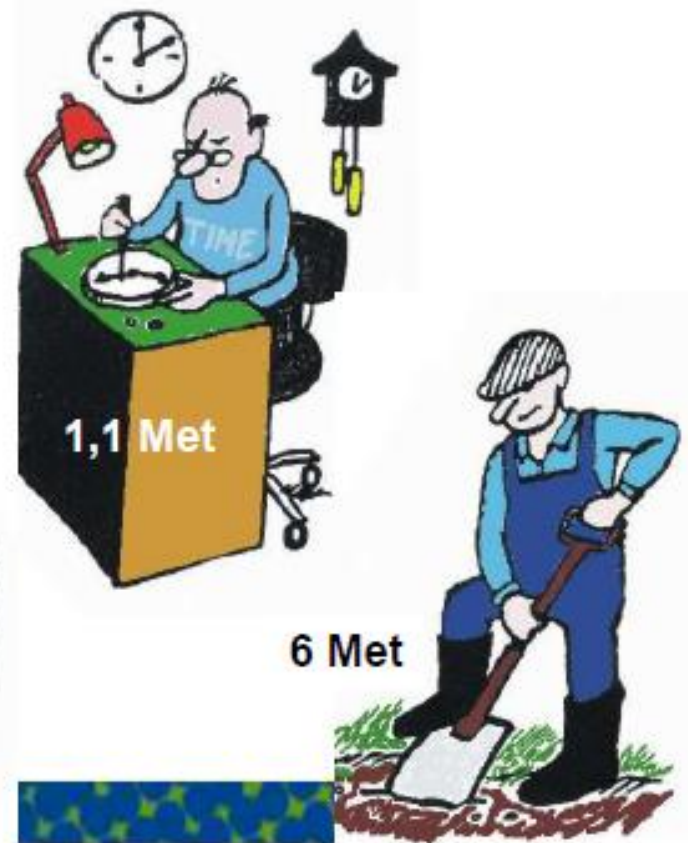
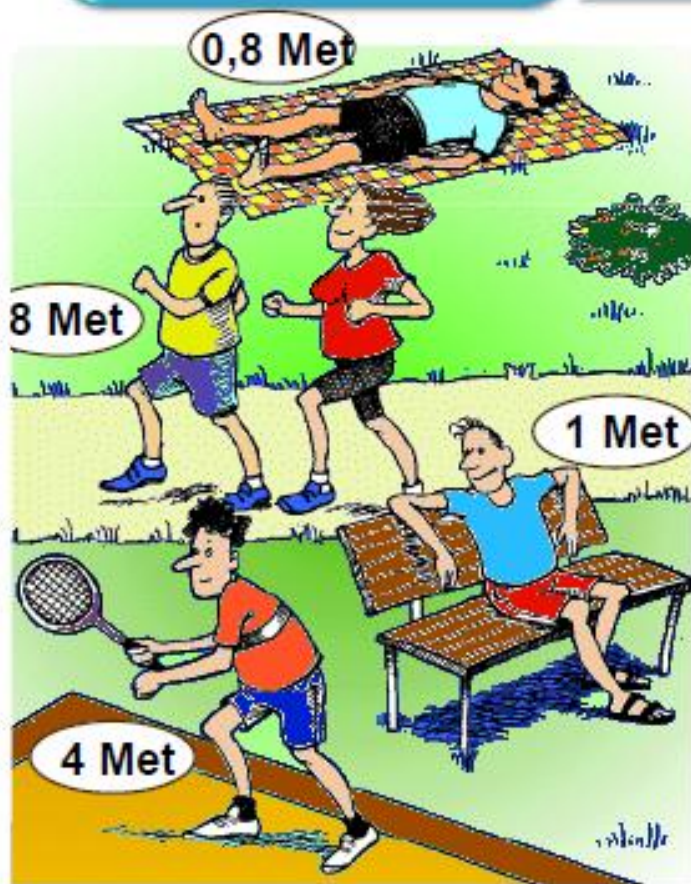
$$A_{du} = 0,202 M_c^{0,425} h^{0,725}$$

Unità di misura: *met* $1\text{met} = 58.1 \text{ W}/\text{m}^2$

Attività metabolica

ATTIVITÀ METABOLICA

- dipende dall'attività fisica svolta, dalle condizioni in cui si svolge e dal tipo di persona (età, costituzione, salute,...)
- Si esprime in "Met", definito come la potenza metabolica emessa da una persona seduta e in quiete:
 $1 \text{ met} = 58,1 \text{ W/m}^2$ (superficie corporea = $1,7 \text{ m}^2$)



Occupazione	Energia metabolica (W/m²)
Artigiani	
Muratore	110 – 160
Falegname	110 – 175
Vetraio	90 – 125
Imbianchino	100 – 130
Panettiere	110 – 140
Macellaio	105 – 140
Orologiaio	55 – 70
Industria	
Fabbro	90 – 200
Saldatore	75 – 125
Tornitore	75 – 125
Operatore alla fresa	80 – 140
Meccanico di precisione	70 – 110
Agricoltura	
Giardiniere	115 – 90
Conduuttore di trattore	85 – 110
Professioni varie	
Insegnante	85 – 100
Commessa	100 – 120
Segretaria	70 – 85

Energia metabolica per varie occupazioni.

Tipo di attività	Valore metabolico [W/m ²]	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

$$C \cdot \Delta T = (M - W) - (Q_{c,res} + Q_{ev,res} + C + R + K + Q_{ev})$$

M =

W = potenza meccanica impegnata per compiere lavoro meccanico;

Q_{ev} =

Q_{c,res} + Q_{ev,res} =

K =

C =

R =

W = potenza meccanica impegnata per compiere lavoro meccanico;

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 (<0.25).
- energia chimica (accumulata dall'organismo come riserva energetica)

Bilancio Energetico

K = Potenza dispersa per conduzione

È quell'aliquota che viene dispersa durante il contatto diretto con corpi solidi.

La sua valutazione è difficile e poiché la sua entità è modesta, in genere, viene **trascurata**.

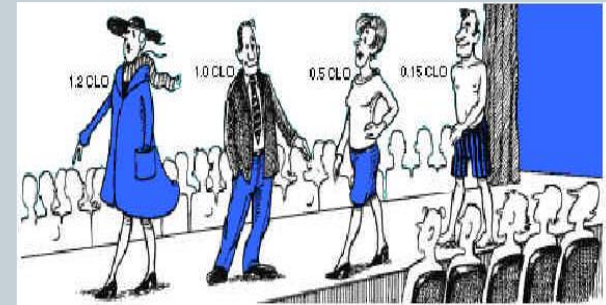
Bilancio Energetico

C = Potenza dispersa per convezione

La superficie esterna del corpo umano si troverà normalmente ad una T diversa da quella dell'aria che lo circonda.

Scambio convettivo

$$C = f_{cl} A_{du} h_c (t_{cl} - t_a)$$



f_{cl} = coefficiente di area dell'abbigliamento;

h_c = coefficiente di convezione abiti-aria ($W/m^2\text{°C}$);

t_{cl} = temperatura media della superficie esterna del corpo umano
abbigliato (°C);

t_a = temperatura dell'aria ambiente (°C).

Bilancio Energetico

R= Potenza dispersa per irraggiamento

La maggior parte delle attività dell'uomo avviene normalmente in spazi confinati in cui le temperatura delle superfici dell'involucro sono spesso differenti dalle temperature del corpo umano.

$$R = A_{eff} h_r (t_{cl} - t_{mr})$$

in cui:

$A_{eff} = A_{du} f_{cl}$ aria della superficie efficace del corpo umano (m^2);

σ = costante di Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

ϵ = emissività della superficie esterna del corpo abbigliato (0,97)

t_{mr} = temperatura media radiante ($^{\circ}\text{C}$)

Bilancio Energetico

Le potenze termiche scambiate per convezione ed irraggiamento dipendono da:

- temperatura superficiale del vestiario (t_{cl})
- temperatura dell'aria e temperatura media radiante (t_a , t_{mr})
- velocità relativa fra soggetto ed aria (nulla per convezione naturale) ($v_{a,r}$)
- abbigliamento del soggetto (I_{cl}).

Resistenza termica del vestiario

È la resistenza termica relativa al vestiario che indossiamo

Si esprime in “Clo”:

$$1 \text{ Clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$$



Resistenza termica dell'abbigliamento

La resistenza termica dell'abbigliamento rappresenta la resistenza al flusso di calore opposta dai vestiti e dallo strato d'aria presente tra i vestiti e la pelle.

E' un valore medio riferito all'intero corpo abbigliato e tiene conto anche delle parti scoperte del corpo, come la testa e le mani.

La resistenza termica è espressa nel sistema internazionale in $\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$, ma, normalmente viene utilizzata un'unità di misura incoerente, il clo, tale che

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{°C}/\text{W}.$$

Si fa ricorso alle tabelle contenute nella ISO 9920.

Esistono due tipologie di tali tabelle:

- quelle contenenti la resistenza termica di tipiche combinazioni di capi di vestiario
- quelle contenenti i valori di resistenza dei singoli capi.

Utilizzando quest'ultima categoria di tabelle, che consentono una stima più accurata, la resistenza termica complessiva è ottenuta come somma delle resistenze termiche dei singoli capi.

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

Combinazioni tipiche di 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, calzettoni 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

$$C \cdot \Delta T = (M - W) - (Q_{c,res} + Q_{ev,res} + C + R + K + Q_{ev})$$

$$Q_{ev} =$$

$$Q_{c,res} + Q_{ev,res} =$$

Q_{ev} è la potenza termica latente scambiata attraverso la pelle dipende dalla percentuale di pelle bagnata, dall'umidità dell'aria e dalla resistenza degli abiti (traspirazione e sudorazione). È quella che spiega perché al variare dell'umidità nell'ambiente cambiano fortemente le condizioni di comfort

$Q_{c,res}$ e $Q_{ev,res}$ 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%.

$$C \cdot \Delta T = (M - W) - (Q_{c,res} + Q_{ev,res} + C + R + K + Q_{ev})$$

Q_{ev} è la potenza termica latente scambiata attraverso la pelle dipende dalla percentuale di pelle bagnata, dall'umidità dell'aria e dalla resistenza degli abiti (traspirazione e sudorazione).

La potenza evaporativa totale (Q_{ev}), quindi, dipende da:

- come siamo vestiti (resistenza degli abiti).
- quanto siamo sudati (percentuale di pelle bagnata).
- condizioni ambientali (differenza tra la pressione di saturazione e la pressione parziale di vapore nell'aria). Quindi, maggiore è tale differenza, maggiore è la potenza termica Q_{ev} che il sudore porta via, raffreddando il corpo.

Al contrario, se l'aria dell'ambiente è già satura d'acqua (pressione parziale prossima alla pressione di saturazione), 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.

$$C \cdot \Delta T = (M - W) - (Q_{c,res} + Q_{ev,res} + C + R + K + Q_{ev})$$

$Q_{c,res} + Q_{ev,res}$

$Q_{c,res}$ e $Q_{ev,res}$ 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%.

$$Q_{c,res} = c_{p,a} (t_{es} - t_a)$$

$$Q_{ev,res} = m_{res} \cdot r (x_{es} - x_a)$$

$$Q_{c,res} , Q_{ev,res}$$

$$Q_{c,res} = c_{p,a} (t_{es} - t_a)$$

$$Q_{ev,res} = m_{res} \cdot r (x_{es} - x_a)$$

- 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.
- r è il calore latente di vaporizzazione.
- $x_{es} - x_a$ è la differenza tra l'umidità specifica dell'aria espirata e quella dell'aria inspirata.

$$Q_{c,res} , Q_{ev,res}$$

$$Q_{c,res} = c_{p,a} (t_{es} - t_a)$$

$$Q_{ev,res} = m_{res} \cdot r (x_{es} - x_a)$$

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

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 cresce del valore di “met” variano anche i valori di $Q_{c,res}$ e $Q_{ev,res}$

.

Bilancio Energetico

Esprimendo i termini dell'equazione di bilancio in funzione delle variabili si ottiene la seguente equazione:

$$C \cdot \Delta T = f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_a, t_{mr}, t_s, Q_{ev})$$

Variabili soggettive **Variabili microclimatiche** **Variabili fisiologiche**

Perché non vi sia accumulo o dispersione di calore dal nucleo del corpo è necessario che la T corporea rimanga costante ($\Delta T=0$), ovvero:

$$f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_a, t_{mr}, t_s, Q_{ev}) = 0$$

Microclima e Misure

Temperatura dell'aria t_a

Per temperatura dell'aria si intende la temperatura dell'aria attorno alla persona al di là dello strato limite adiacente alla persona.

Tale temperatura va misurata ad un'altezza di 0,6 m dal suolo per persone sedute e di 1 m per persone in piedi.

Per la misura è opportuno usare strumenti con $10 < t < 30$ °C, con una precisione di $\pm 0,5$ °C

Velocità dell'aria v_a

La **velocità dell'aria** interviene negli scambi termici per convezione.

Nella valutazione del comfort si fa riferimento alla velocità relativa dell'aria per tener conto del movimento del soggetto all'interno dell'ambiente.

Nota la velocità dell'aria, la velocità relativa viene calcolata con la seguente espressione, funzione del metabolismo energetico:

$$v_{ar} = v_a + 0,0052 (M - 58)$$

Microclima e Misure

Velocità dell'aria

L'ISO raccomanda:

$v < 0,15$ m/sec in inverno;

$v < 0,25$ m/sec in estate;

Per la misura è necessario usare strumenti che consentano di misurare $0,05 < v < 1$ m/s, con una precisione di $\pm 0,05^\circ\text{C}$

Microclima e Misure

Umidità dell'aria

L'umidità relativa dell'aria influenza la sensazione termica di soggetti posti in ambiente termicamente moderati.

L'ISO propone come intervallo di comfort quello con grado igrometrico compreso tra 0,3-0,7.

Microclima e Misure

Temperatura Media Radiante

Essa dipende:

1. Dalla temperatura di tutte le superfici che si trovano attorno alla persona
2. Dalla posizione dell'individuo rispetto alle superfici stesse.

$$T_{mr}^4 = T_1^4 \cdot F_{p \rightarrow 1} + T_2^4 \cdot F_{p \rightarrow 2} + T_3^4 \cdot F_{p \rightarrow 3} + \dots + T_n^4 \cdot F_{p \rightarrow n}$$

Microclima e Misure

La Temperatura Operativa: t_o

La temperatura operativa dipende dagli scambi radiativi e convettivi e viene calcolata con la relazione:

$$t_o = \frac{h_r t_{mr} + h_c t_a}{h_r + h_c}$$

h_r e h_c coefficienti allo scambio termico superficiali per irraggiamento e per convezione, rispettivamente.

Microclima e Misure

La Temperatura Operativa: t_o

Data la difficoltà di valutare h_r e h_c , la ISO 7730 propone due espressioni semplificate da applicarsi: 1. quando la velocità relativa dell'aria è bassa (< 0.2 m/s); 2. quando la differenza tra la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria è piccola ($< 4^\circ\text{C}$).

1. La prima fornisce un valore della temperatura operativa dipendente dalla velocità relativa dell'aria per mezzo di un coefficiente **A**:

$$t_o = A t_a + (1 - A) t_{mr}$$

Velocità relativa dell'aria (m/s)	Coefficiente A
< 0.2	0.5
0.2 – 0.6	0.6
0.6 – 1.0	0.7

Microclima e Misure

La Temperatura Operativa: t_o

2. La seconda espressione è una invece semplice media aritmetica dei valori delle due temperature dalle quali la temperatura operativa dipende

$$t_o = \frac{t_a + t_{mr}}{2}$$

Equazione del benessere ($C \cdot \Delta T = 0$), :

$$f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_a, t_{mr}, t_s, Q_{ev}) = 0$$

Variabili fisiologiche

Variabili soggettive **Variabili microclimatiche**

Una prima condizione perché si abbia benessere è che nell'equazione di bilancio si mantenga costante l'energia interna del corpo.

La verifica dell'equazione di bilancio è però soltanto una condizione necessaria ma non sufficiente per raggiungere il benessere, poiché l'individuo può avvertire una sensazione di caldo o di freddo pur trovandosi in equilibrio termico.

METODO SEMPLIFICATO (Fanger)

Il gradimento di un ambiente può essere espresso con il valore medio di una votazione fatta da un campione di persone e basata su una scala di «**sensazione termica**».

+3 molto caldo

+2 caldo

+1 leggermente caldo

0 confortevole

-1 leggermente freddo

-2 freddo

-3 molto freddo

METODO SEMPLIFICATO (Fanger)

PMV
(Voto Medio
Previsto)

- Esprime il gradimento di un ambiente termico da parte di una persona su una scala che va da -3 (molto freddo) a +3 (molto caldo). $PMV = 0 \rightarrow T_c$
- Range di Comfort: $-0,5 < PMV < 0,5$

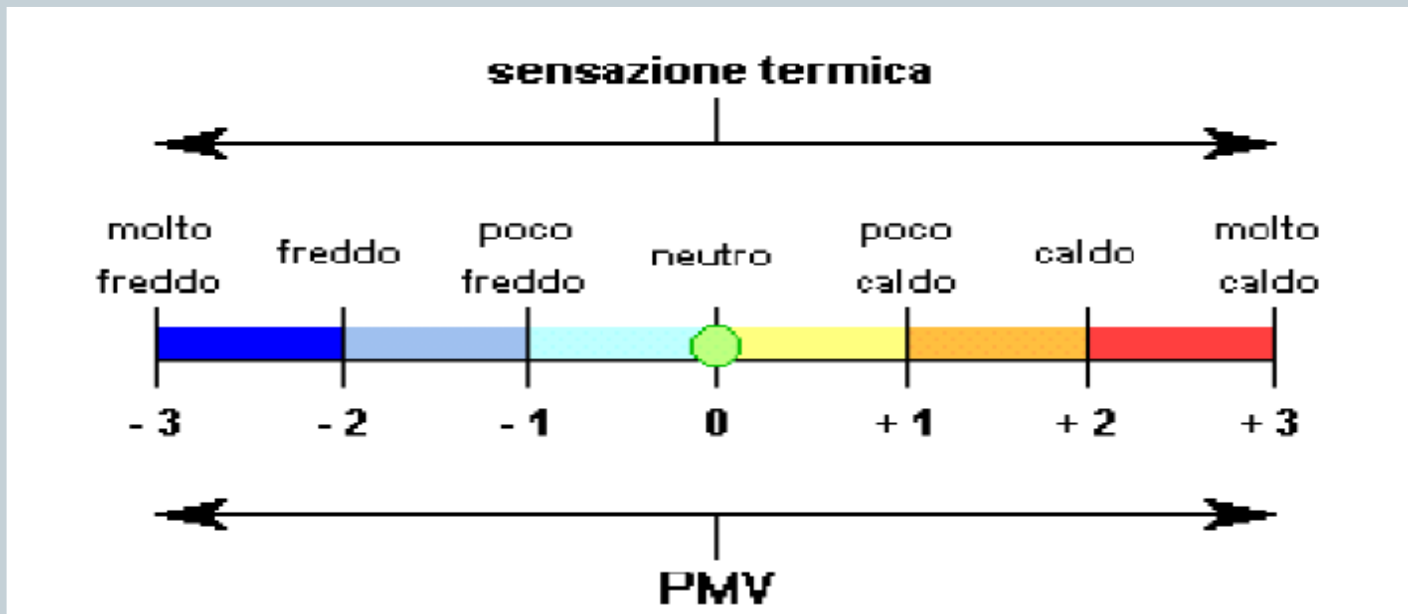
PPD
(Percentuale
prevista di
insoddisfatti)

- Predice la percentuale di persone che non si riterrà termicamente soddisfatta ($PMV = \pm 2, \pm 3$) in corrispondenza di particolari condizioni climatiche-fisiologiche

Indici di Fanger

PMV (Predict Mean Vote)

Esprime un voto medio previsto per la sensazione di benessere termico di un campione di soggetti posti nel medesimo ambiente, i quali esprimono la propria sensazione termica soggettiva attraverso una scala psicofisica comprendente sette voci.



Indici di Fanger

PPD (predict percentage of dissatisfied)

I voti individuali espressi dai soggetti risultano dispersi rispetto al valore medio dato dal PMV.

Per tale motivo, Fanger introdusse l'indice **PPD**.

Soggetto Insoddisfatto

Una persona che, sottoposta ad un determinato carico termico, esprima una votazione di +3, +2, -2 o -3 della scala di sensazione termica

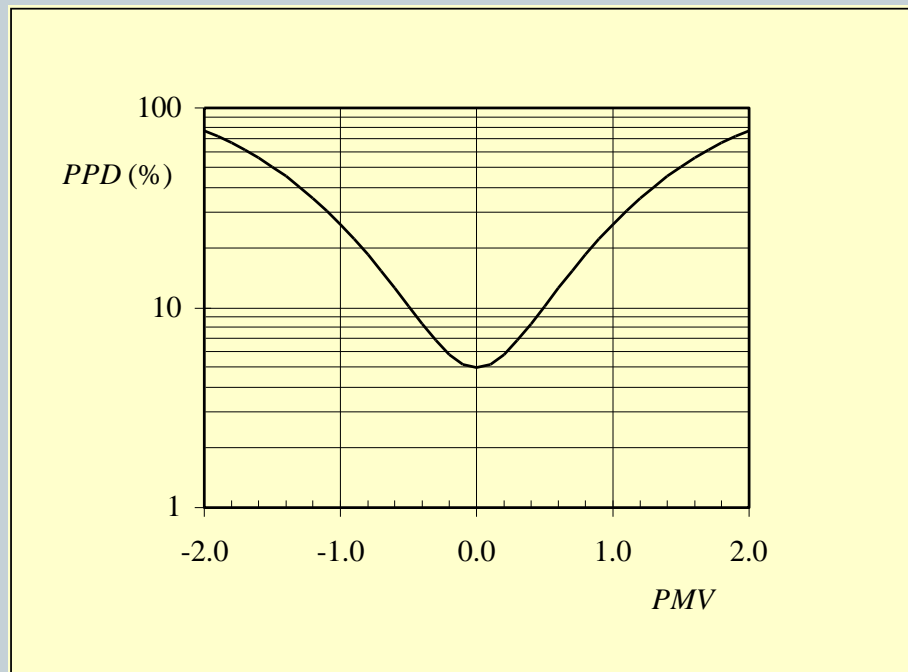
Indici di Fanger

2.2 PPD (predict percentage of dissatisfied)

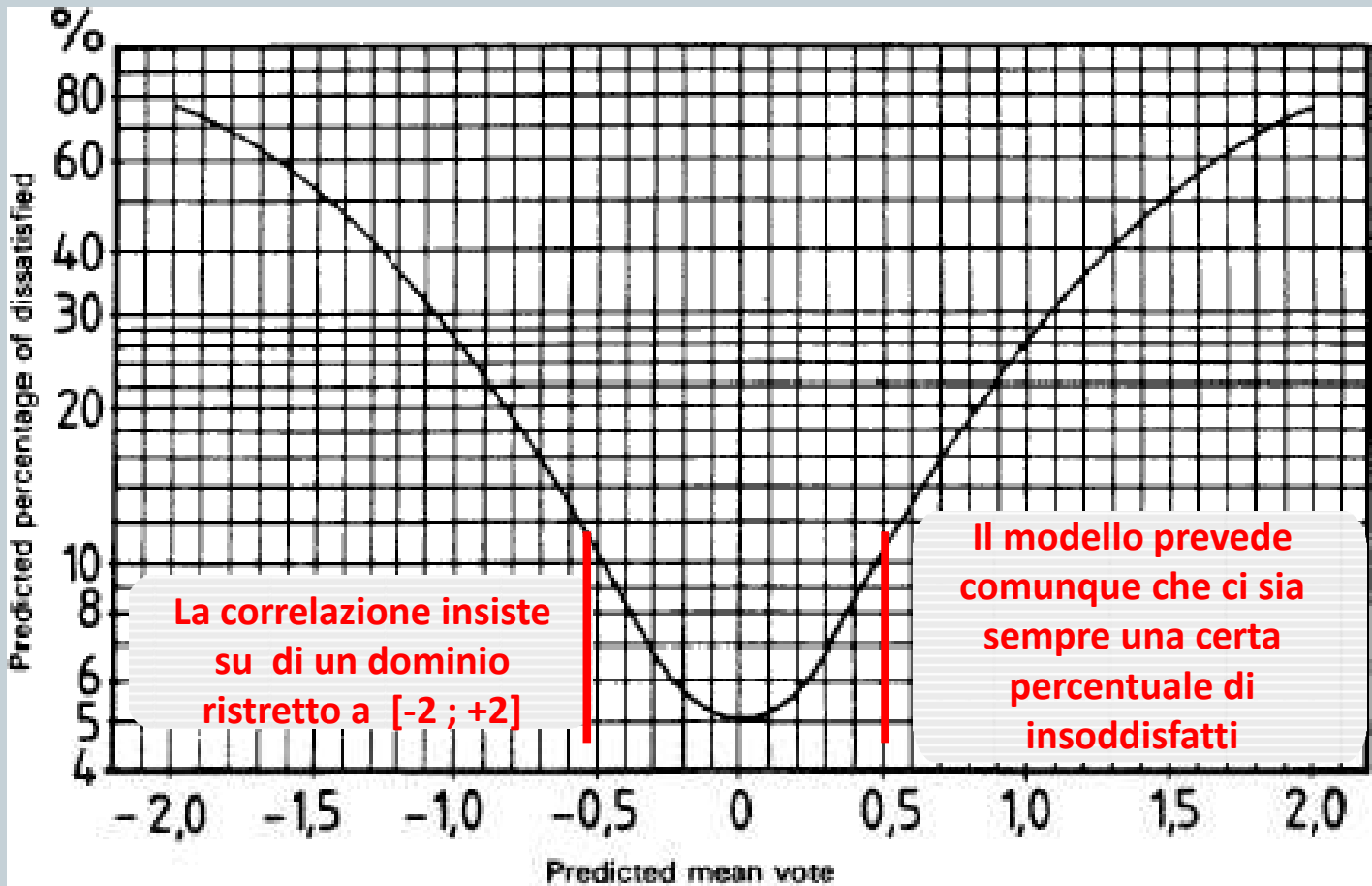
Per ciascun valore del PMV è possibile determinare un corrispondente valore di PPD.

Il legame tra i due parametri è esprimibile per mezzo della seguente equazione:

$$PPD = 100 - 95 e^{-\left(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2\right)}$$

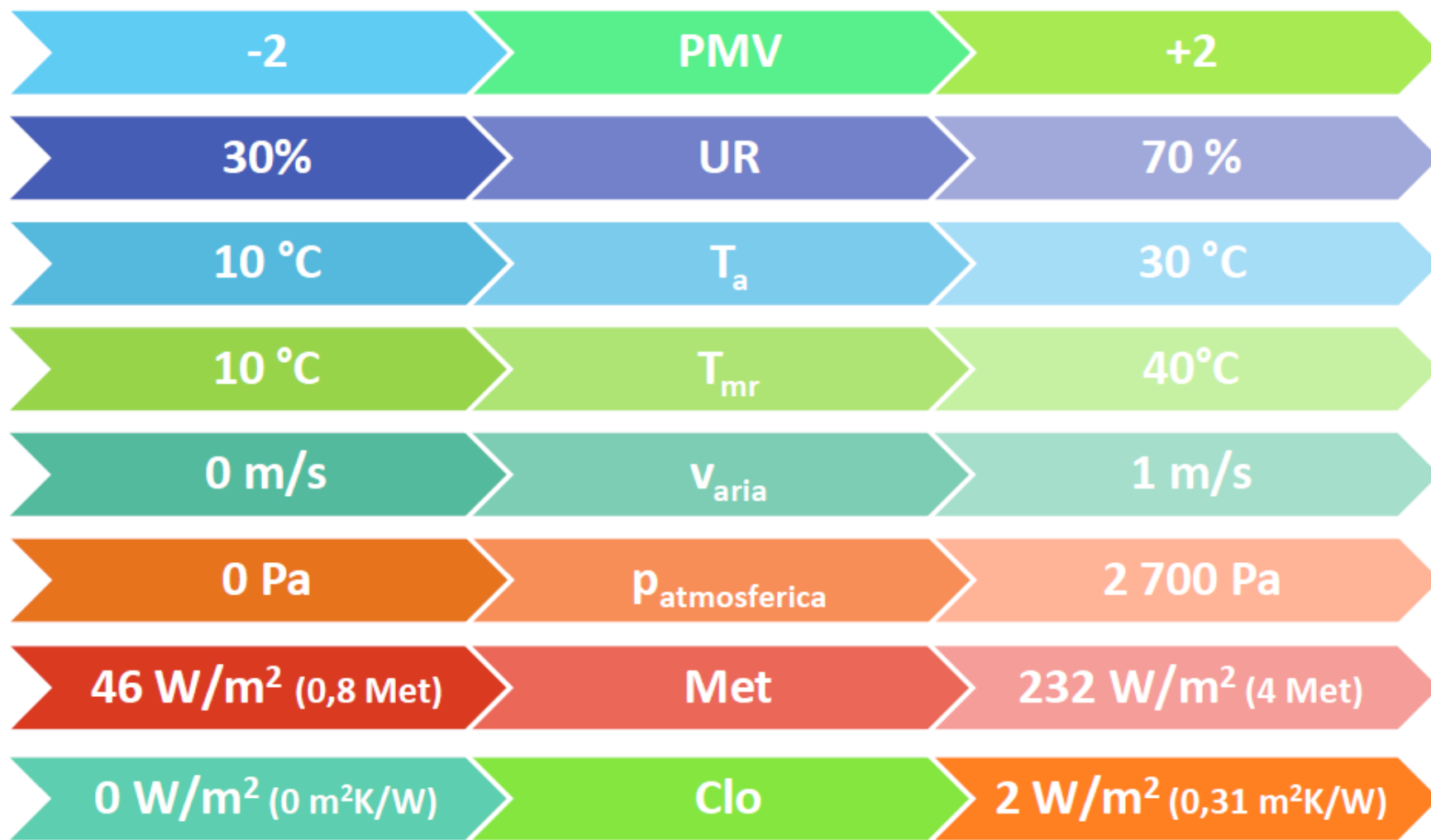


Relazione tra PMV e PPD



Intervallo di comfort termico: $-0,5 < PMV < +0,5$

Limiti di applicabilità del modello di Fanger



Valutazione del PMV con le tabelle della norma ISO 7730

La norma ISO 7730 contiene 9 tabelle per il calcolo del PMV.

Ciascuna tabella è riferita

- ad un assegnato livello metabolico
- ad una umidità relativa del 50%;

all'interno di ognuna di esse il valore del PMV è riportato per vari valori

- della resistenza termica
- dell'abbigliamento,
- della temperatura operativa e
- della velocità relativa dell'aria.

Indici di Fanger

ESEMPIO

Si supponga di trovarsi a svolgere:

- attività sedentaria ($M = 1 \text{ met}$),
- abbigliati con vestiti aventi una resistenza termica di 1 clo,
- in un ambiente con umidità relativa del 50%,
- temperatura dell'aria pari a 19°C ,
- temperatura media radiante di 21°C e
- velocità relativa dell'aria di 0.10 m/s .

$$t_o = \frac{t_a + t_{mr}}{2} = 20^\circ\text{C}$$

Indici di Fanger

Tabella . Determinazione del PMV: livello di attività 58 W/m² (1 met).

I_{cl} (clo)	I_{cl}	t_o (°C)	v_{ar} (m/s)								
	(m ² °C/W)		< 0.10	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	1.00	
0	0	26	-1.62	-1.62	-1.96	-2.34					
		27	-1.00	-1.00	-1.36	-1.69					
0.25	0.039	24	-1.52	-1.52	-1.80	-2.06	-2.47				
		25	-1.05	-1.05	-1.33	-1.57	-1.94	-2.24	-2.48		
1.00	0.155	20	-0.85	-0.87	-1.02	-1.13	-1.29	-1.41	-1.51	-1.81	
		21	-0.57	-0.60	-0.74	-0.84	-0.99	-1.11	-1.19	-1.47	
		22	-0.30	-0.33	-0.46	-0.55	-0.69	-0.80	-0.88	-1.13	
1.50	0.233	14	-1.36	-1.36	-1.49	-1.58	-1.72	-1.82	-1.89	-2.12	
		16	-0.94	-0.95	-1.07	-1.15	-1.27	-1.36	-1.43	-1.63	

$$PMV = -0.87.$$

Il soggetto avrà allora una sensazione di freddo

I_{cl} (clo)	I_{cl} (m ² °C/W)	t_o (°C)	v_{ar} (m/s)							
			< 0.10	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	1.00
0	0	26	-1.62	-1.62	-1.96	-2.34				
		27	-1.00	-1.00	-1.36	-1.69				
		28	-0.39	-0.42	-0.76	-1.05				
		29	0.21	0.13	-0.15	-0.39				
		30	0.80	0.68	0.45	0.26				
		31	1.39	1.25	1.08	0.94				
		32	1.96	1.83	1.71	1.61				
		33	2.50	2.41	2.34	2.29				
0.25	0.039	24	-1.52	-1.52	-1.80	-2.06	-2.47			
		25	-1.05	-1.05	-1.33	-1.57	-1.94	-2.24	-2.48	
		26	-0.58	-0.61	-0.87	-1.08	-1.41	-1.67	-1.89	-2.66
		27	-0.12	-0.17	-0.40	-0.58	-0.87	-1.10	-1.29	-1.97
		28	0.34	0.27	0.07	-0.09	-0.34	-0.53	-0.70	-1.28
		29	0.80	0.71	0.54	0.41	0.20	0.04	-0.10	-0.58
		30	1.25	1.15	1.02	0.91	0.74	0.61	0.50	0.11
		31	1.71	1.61	1.51	1.43	1.30	1.20	1.12	0.83
0.50	0.078	23	-1.10	-1.10	-1.33	-1.51	-1.78	-1.99	-2.16	
		24	-0.72	-0.74	-0.95	-1.11	-1.36	-1.55	-1.70	-2.22
		25	-0.34	-0.38	-0.56	-0.71	-0.94	-1.11	-1.25	-1.71
		26	0.04	-0.01	-0.18	-0.31	-0.51	-0.66	-0.79	-1.19
		27	0.42	0.35	0.20	0.09	-0.08	-0.22	-0.33	-0.68
		28	0.80	0.72	0.59	0.49	0.34	0.23	0.14	-0.17
		29	1.17	1.08	0.98	0.90	0.77	0.68	0.60	0.34
		30	1.54	1.45	1.37	1.30	1.20	1.13	1.06	0.86
0.75	0.116	21	-1.11	-1.11	-1.30	-1.44	-1.66	-1.82	-1.95	-2.36
		22	-0.79	-0.81	-0.98	-1.11	-1.31	-1.46	-1.58	-1.95
		23	-0.47	-0.50	-0.66	-0.78	-0.96	-1.09	-1.20	-1.55
		24	-0.15	-0.19	-0.33	-0.44	-0.61	-0.73	-0.83	-1.14
		25	0.17	0.12	-0.01	-0.11	-0.26	-0.37	-0.46	-0.74
		26	0.49	0.43	0.31	0.23	0.09	0.00	-0.08	-0.33
		27	0.81	0.74	0.64	0.56	0.45	0.36	0.29	0.08
		28	1.12	1.05	0.96	0.90	0.80	0.73	0.67	0.48
1.00	0.155	20	-0.85	-0.87	-1.02	-1.13	-1.29	-1.41	-1.51	-1.81
		21	-0.57	-0.60	-0.74	-0.84	-0.99	-1.11	-1.19	-1.47
		22	-0.22	-0.22	-0.33	-0.45	-0.55	-0.66	-0.76	-1.10

Discomfort Locale

Si può verificare che, anche per valori accettabili del PMV, il soggetto non sia soddisfatto riguardo all'ambiente circostante

Questo è dovuto a disuniformità nei valori delle variabili ambientali e porta al fenomeno del discomfort localizzato

Condizioni di discomfort localizzato



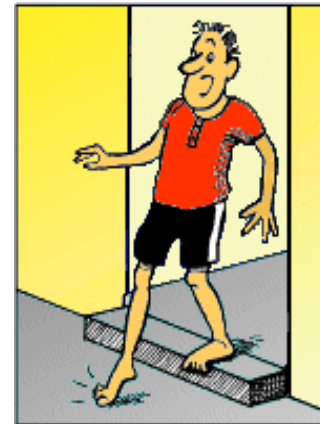
**Correnti
d'aria**



**Asimmetria
radiante**

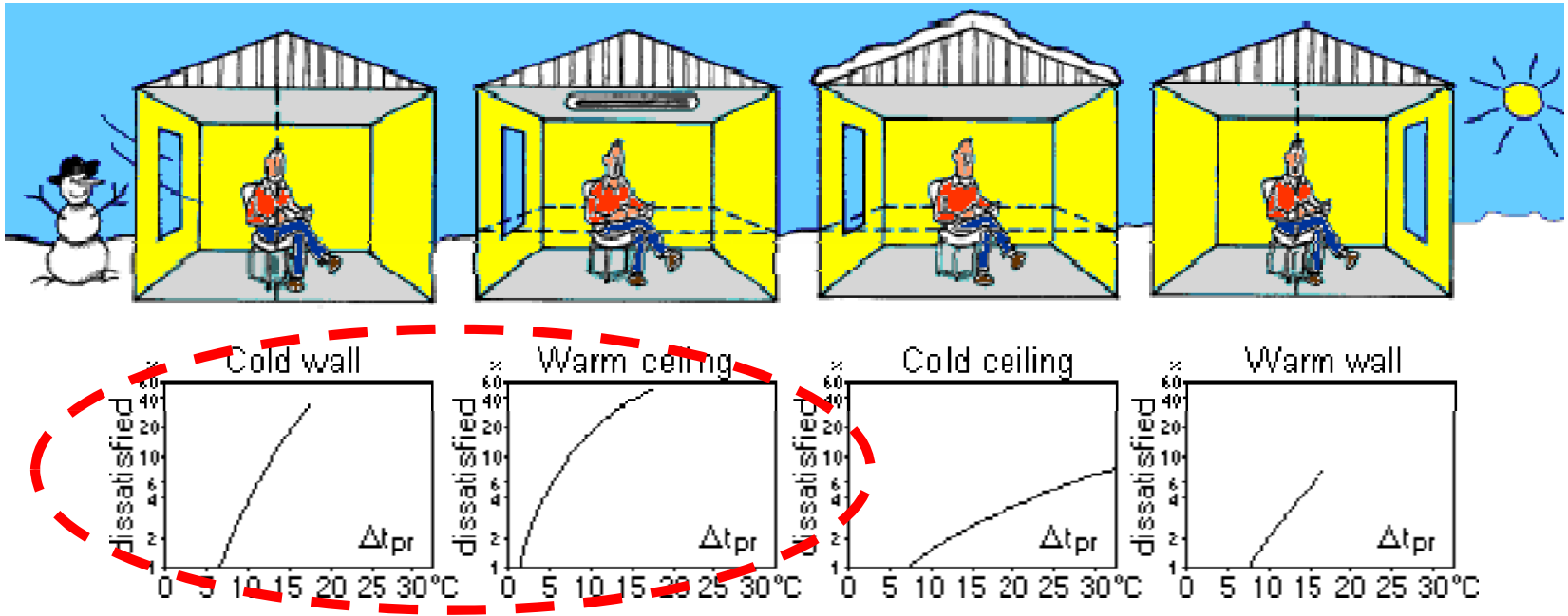


**Gradiente
termico
verticale**



**Temperatura
del
pavimento**

Asimmetria radiante

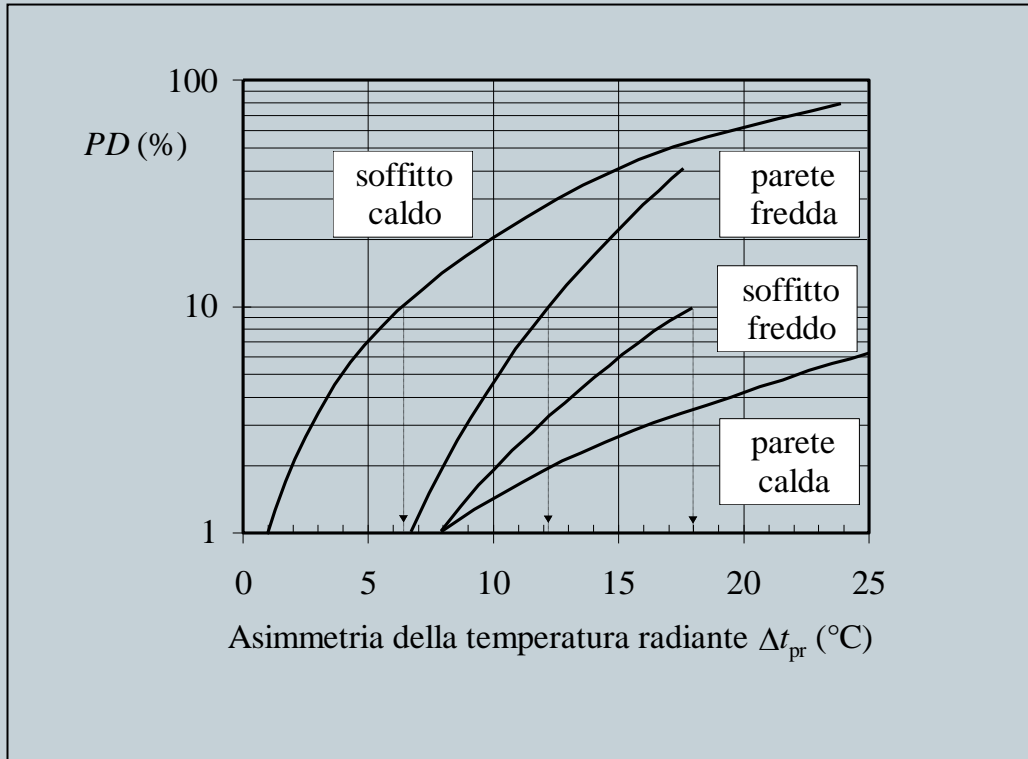


Le persone sono maggiormente sensibili a pareti fredde e a soffitti caldi

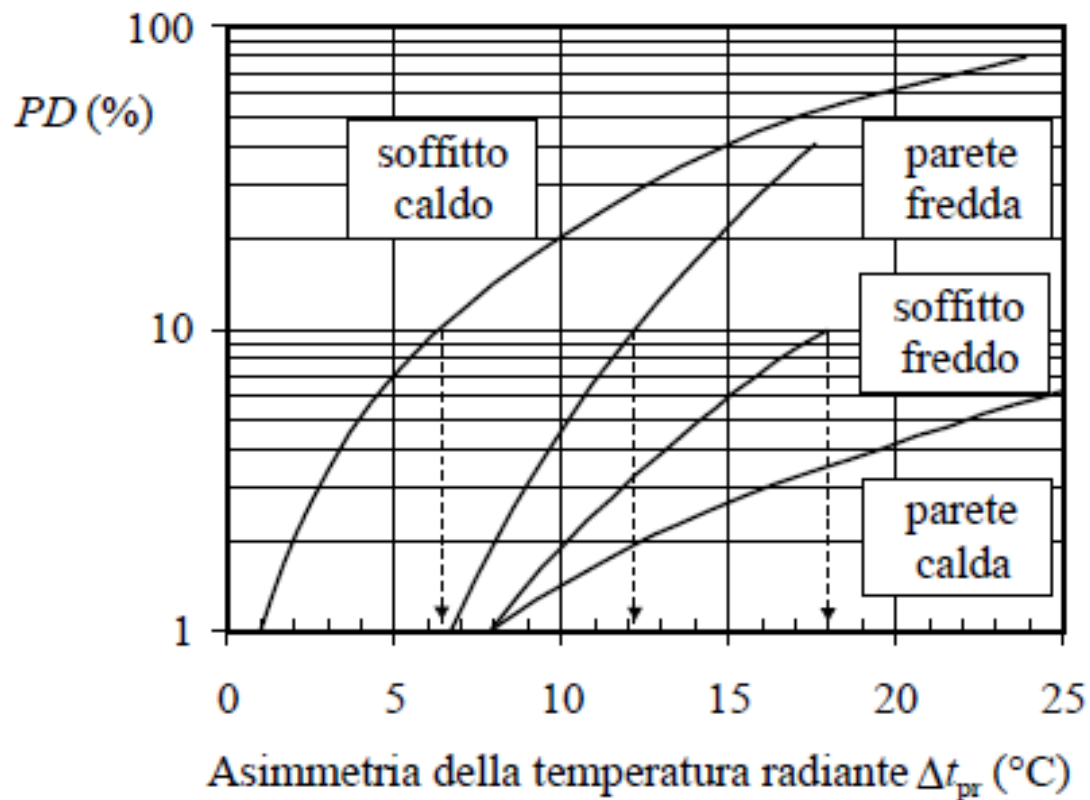
**Per ridurre il PPD intorno al 5%: per le pareti fredde $\Delta T < 10^\circ\text{C}$
per i soffitti caldi $\Delta T < 5^\circ\text{C}$**

Discomfort Locale

Asimmetria Radiante



Dalla figura si nota che una parete calda comporta meno disagio rispetto ad una fredda, mentre un soffitto caldo determina più disagio di uno freddo.



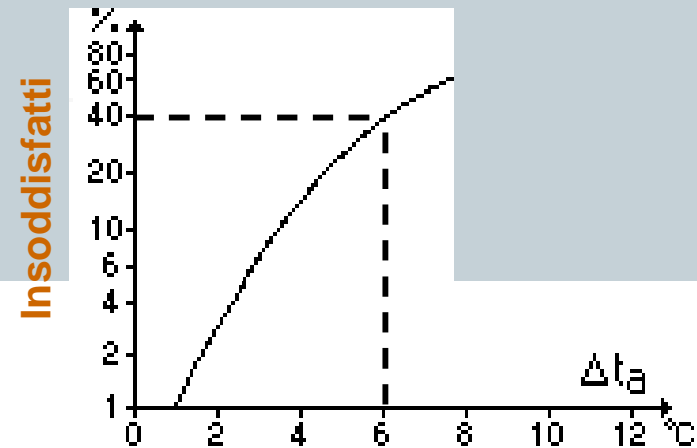
Se si vuole mantenere la percentuale di insoddisfatti al di sotto della soglia del 10% è necessario limitare l'asimmetria radiante a $6,5^\circ\text{C}$ per un soffitto caldo, a 12°C per una parete fredda, a 18°C per un soffitto freddo, mentre **non vi sono praticamente limitazioni per una parete calda.**

Gradiente termico verticale

25 °C



19 °C



Δt_a = differenza tra la temperatura a livello della testa e quella a livello dei piedi.

Discomfort Locale

Temperatura del Pavimento

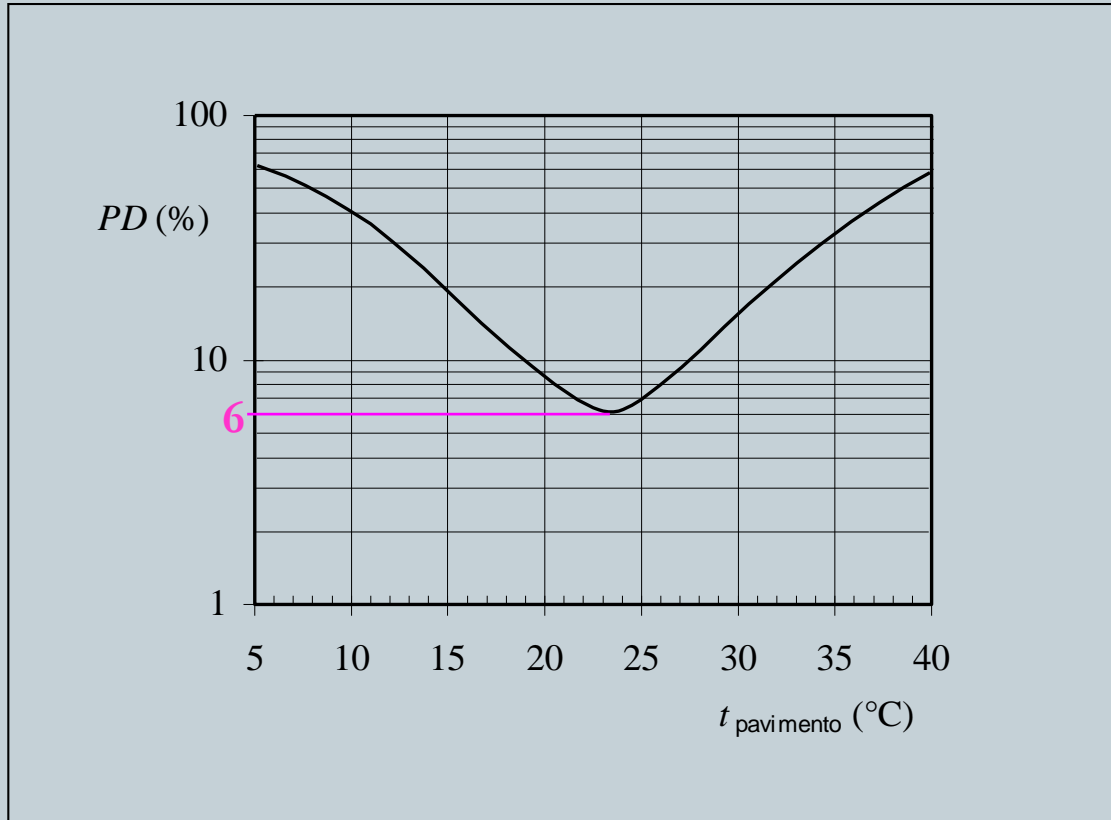
A causa del contatto tra i piedi ed il pavimento possono verificarsi condizioni di discomfort localizzato qualora il pavimento sia troppo caldo o troppo freddo.

La sensazione termica dipende da:

1. tempo di esposizione
2. persone scalze o per persone con scarpe; se un soggetto è scalzo, sarà differente a seconda del tipo di materiale usato per il pavimento.
3. persone sedute o in piedi

Discomfort Locale

T del Pavimento



Percentuale di insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento per persone **in piedi**, in movimento, che indossano scarpe e calze.

Discomfort Locale

Correnti d'aria

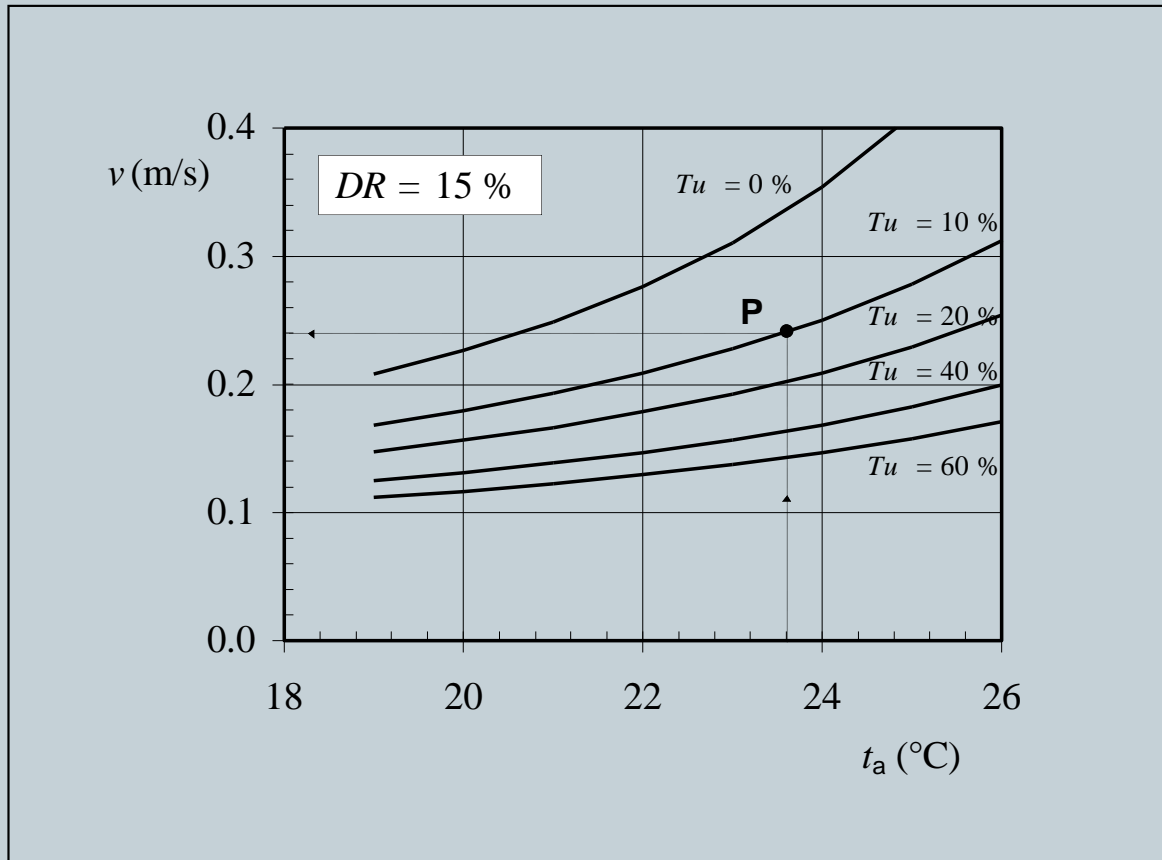
La sensazione di disagio dipende da:

1. temperatura della corrente d'aria (il discomfort diminuisce per alte temperature),
2. differenza della temperatura della corrente d'aria rispetto alla temperatura dell'aria ambiente (il discomfort aumenta all'aumentare di questa quantità),
3. zona del corpo che viene investita dalla corrente (le parti più sensibili sono la testa, il collo e le caviglie)
4. attività dell'individuo (la sensibilità alle correnti diminuisce con l'aumentare dell'attività).

Indice Rischio da correnti d'aria (DR, Draught Rating) che esprime la percentuale di persone che si prevede possano essere infastidite dalla corrente d'aria.

Discomfort Locale

Correnti d'aria



Velocità media dell'aria ammissibile in funzione della temperatura dell'aria e dell'intensità di turbolenza. **Nell'esempio di figura, ad una temperatura dell'aria di 23°C e un'intensità di turbolenza del 10% corrisponde un limite massimo tollerabile di 0.22 m/s per la velocità dell'aria**

In ogni ambiente, l'aria circola, con velocità non costanti all'interno dell'intera zona. Il movimento dell'aria può iniziare ad essere percepito quando ha un velocità pari o superiore a **0.3 m/s**.

In regime estivo, un movimento d'aria entro 1 m/s non è fastidioso, mentre, in regime invernale, anche la minima percezione di corrente (**aria con velocità superiore a 0.35 m/s**) può essere fastidiosa.

Velocità dell'aria:

- *Fino a 0.25 m/s: impercettibile;*
- *0.25-0.50 m/s: piacevole (in estate);*
- *0.50-1.00 m/s: sensazione di aria in movimento;*
- *1.00-1.50 m/s: corrente d'aria da lieve a fastidiosa;*
- *Oltre 1.50 m/s: fastidiosa.*

La ventilazione influisce anche sulla qualità dell'aria interna e quindi sulla salute degli occupanti.

La Norma ISO 7730

Grandezza	Periodo invernale	Periodo estivo
Temperatura operativa	20 – 24 °C	23 – 26 °C
Differenza verticale di temperatura	< 3 °C	< 3 °C
Temperatura superficiale del pavimento	19 – 26 °C	non specificata
Asimmetria della temperatura radiante dovuta a finestre o superfici fredde verticali	< 10 °C	non specificata
Asimmetria della temperatura radiante dovuta ad un soffitto caldo riscaldato	< 5 °C	non specificata
Umidità relativa	30 – 70 %	30 – 70 %

Requisiti di benessere raccomandati per attività leggera, fondamentale sedentaria.