



Assimpredil ANCE
20 ottobre 2010
Milano



POLITECNICO DI MILANO



Il comfort negli ambienti

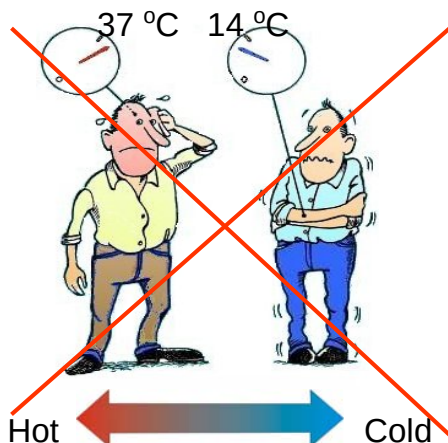
Prof. Livio Mazzarella



Obbiettivo

2

Strumenti per progettare l'edificio in
modo da assicurare il **BENESSERE** con il
MINIMO COSTO ENERGETICO





- Cos'è il benessere termoigrometrico (comfort termico)
- Ambiente termico e bilancio termico
- Equazione del comfort e predizione
- Fattori influenzanti il comfort
- Indici ambientali di comfort
- Malessere termico localizzato
- Misure di comfort termico
- Progettazione del comfort
- Comfort adattativo



Cos'è il benessere termoigrometrico



Definizione

- Quella condizione della mente che esprime soddisfazione per l'ambiente (termico) circostante.
UNI EN ISO 7730



Il benessere è legato a diverse componenti:

➤ Fisiche:

Sensazione

le caratteristiche termiche e igrometriche dell'ambiente, le caratteristiche oggettivabili dell'osservatore



➤ Fisiologiche:

Percezione

le caratteristiche biofisiche dei sensi dell'osservatore



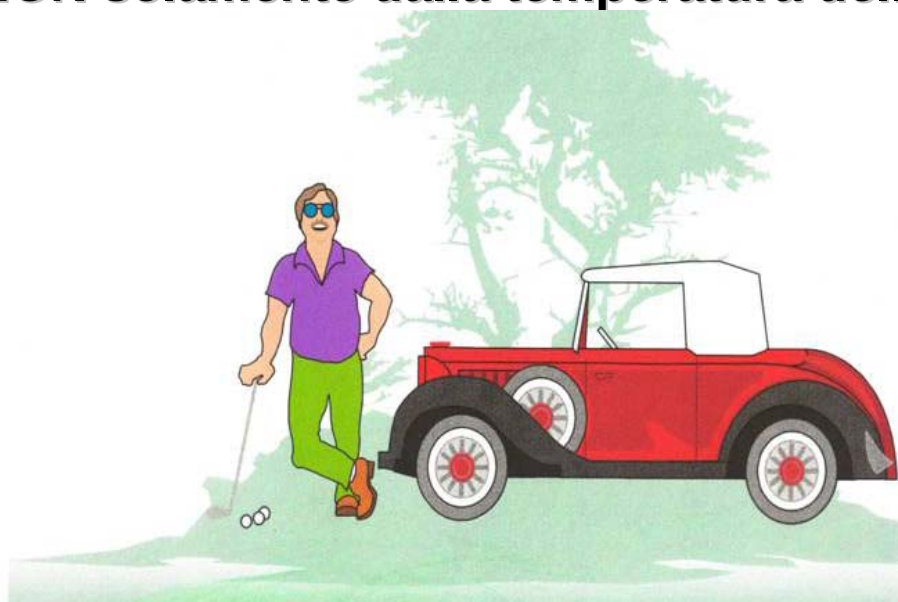
➤ Psicologiche:

l'interpretazione fatta dall'osservatore dello stimolo ricevuto



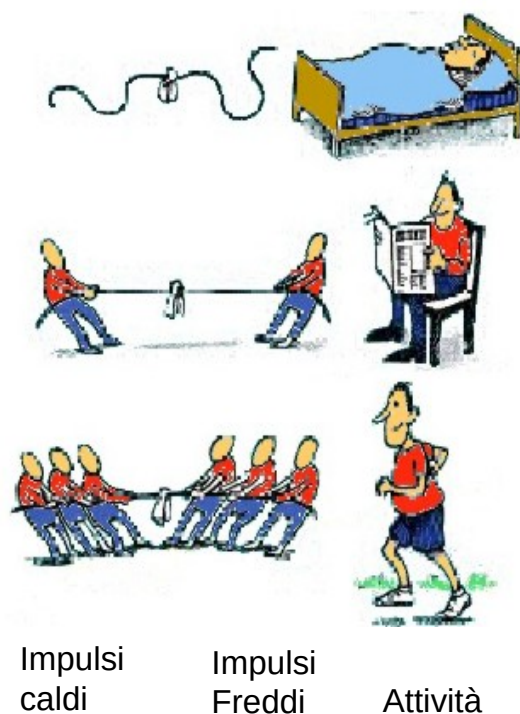
Il benessere termoigrometrico (comfort termico) è quindi influenzato da molti parametri

NON solamente dalla temperatura dell'aria!





- Temperatura interna normale: 37 °C
- Abbiamo sensori separati per il caldo e per il freddo:
 - Il sensore per il caldo è localizzato nell'ipotalamo e segnala quando la temperatura supera i 37 °C
 - I sensori per il freddo sono localizzati nella pelle e segnalano quando la sua temperatura scende sotto i 34 °C.
- Meccanismi di riscaldamento:
 - Ridotto afflusso sanguigno (**vasocostrizione**)
 - Brividi
- Meccanismi di raffreddamento:
 - Elevato afflusso sanguigno (**vasodilatazione**)
 - Sudorazione (evaporazione)
 - Traspirazione

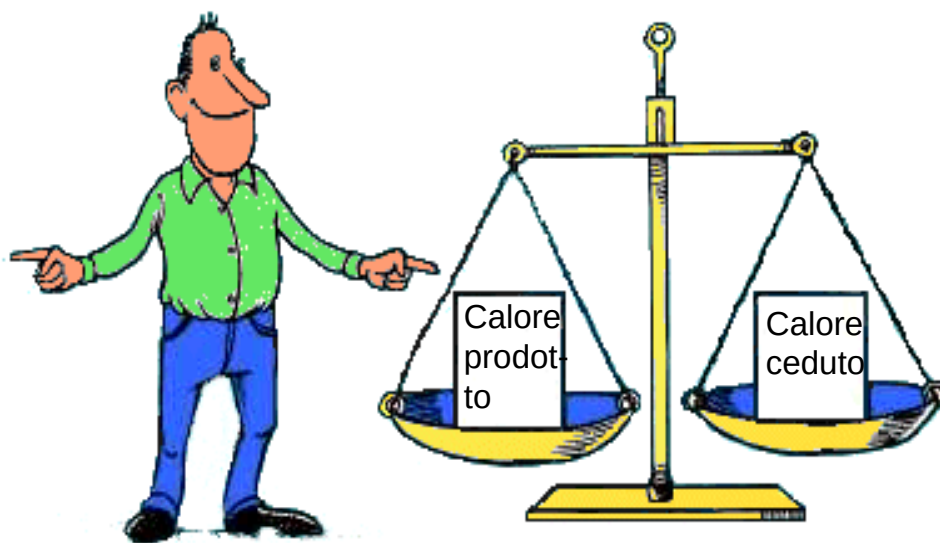


- Il sensore di caldo nell'ipotalamo invia impulsi quando la temperatura eccede i 37 °C
- I sensori di freddo inviano impulsi quando la temperatura della pelle scende sotto i 34 °C
- Maggiore è la differenza di temperatura, maggiore è la magnitudine dell'impulso
- Se gli impulsi (caldo e freddo) sono della stessa magnitudine, il soggetto percepisce l'ambiente termicamente neutro
- Altrimenti, lo percepisce o caldo o freddo



T_{eff} °C	Comfort	Regolazione	Salute
40	Assolutamente non confortevole	Fallimento regolazione	Collasso circolatorio
35		Aumento stress per vasodilatazione e sudorazione eccessiva	Pericolo di colpi calore Disturbi tachicardici
30	Non confortevole		
25	Confortevole	Normale vasodilatazione e sudorazione	Normale
20		Vasocostrizione	
15	Poco confortevole	Impulso stimoli comportamentali	
			Disturbi per pelle secca

Milano 20 - 10- 2010 - Prof. Livio Mazzarella - POLITECNICO DI MILANO



Il benessere termoisgrometrico può essere mantenuto solamente quando il calore prodotto dal metabolismo eguaglia le perdite termiche del corpo



$$\frac{dE_T}{dt} = \Phi_{E_C} - \dot{W} - \Phi_T$$

$$\frac{d(U + E_c)}{dt} = \Phi_{E_C} - \dot{W} - \Phi_T$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(E_c)}{dt} = \Phi_{E_C} - \Phi_M \\ \frac{dU}{dt} = \Phi_M - \dot{W} - \Phi_T \end{array} \right.$$

La variazione di energia E_T del corpo nel tempo è dovuta

- ▶ al flusso netto di energia chimica (alimenti), Φ_{E_C}
- ▶ alla potenza meccanica ceduta dal corpo, $\dot{W}$
- ▶ al flusso termico scambiato, Φ_T (positivo se ceduto)

Separando l'energia interna, U , dalla chimica, E_c , attraverso il flusso metabolico, Φ_M , si ricava l'**equazione di bilancio termico**



Esprimendo l'energia interna come:

$$U = C \cdot T$$

l'equazione di bilancio dell'energia interna si può esprimere in termini di temperatura

$$C \frac{d\langle T \rangle}{dt} = \Phi_M - \dot{W} - \Phi_T$$

dove C è la capacità termica del corpo umano
 $\langle T \rangle$ è la temperatura media del corpo

Se $\Phi_M - \dot{W} - \Phi_T > 0 \Rightarrow \langle T \rangle \uparrow$ **cresce**

$\Phi_M - \dot{W} - \Phi_T < 0 \Rightarrow \langle T \rangle \downarrow$ **decresce**



Bilancio termico generale

$$S = M - W - E - (R + C) \quad [W/m^2]$$

dove

S = accumulo termico per unità di tempo nel corpo

M = flusso metabolico

W = potenza meccanica ceduta dal corpo umano

E = flusso termico evaporativo totale (**latente**)

$R + C$ = scambio termico “**sensibile**” per radiazione e convezione termica

A_{cu} = area della pelle del corpo umano

$$\frac{dU}{dt} = A_{cu} \cdot S \quad ; \quad \Phi_M = A_{cu} \cdot M \quad ; \quad \dot{W} = A_{cu} \cdot W \quad ; \quad \Phi_T = A_{cu} \cdot (E + R + C)$$



Equazione di bilancio termico

- Tasso di accumulo termico, S
 - proporzionale alla velocità di variazione della temperatura media del corpo
 - normalmente, S è nullo; controllato dal sistema termoregolatorio del corpo
- Tasso metabolico, M
 - potenza termica specifica generata dalle attività di ossidazione cellulare degli zuccheri
 - dipende dall'attività muscolare, dall'ambiente, dimensione del corpo, ecc.; l'unità di misura è il “met” (=58.2 W/m²)
 - 1 met = persona seduta in quiete (100 W se l'area della superficie corporea è 1.72 m²)



- “Lavoro meccanico”, W
 - potenza specifica “muscolare” del corpo umano trasformata in potenza meccanica trasferita all'esterno
 - può essere espressa in funzione del tasso di produzione metabolica M tramite il **rendimento meccanico dell'organismo umano** :

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

che risulta molto basso, $0 < \eta < 0.2$.

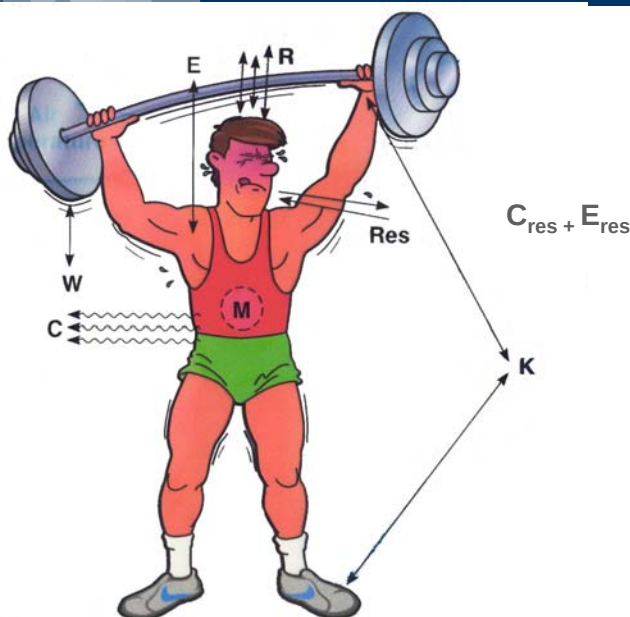


- “Perdite termiche evaporative (**latenti**), E
 - rilascio di “calore latente” tramite l'evaporazione di fluido corporeo
 - perdite di vapore attraverso la respirazione (perdite termiche di respirazione: latente E_{rel} e sensibile E_{rec})
 - perdite termiche evaporative dalla pelle (includenti sia la diffusione del vapore attraverso la pelle, traspirazione E_{dif} , sia la sudorazione regolatoria E_{rsw})



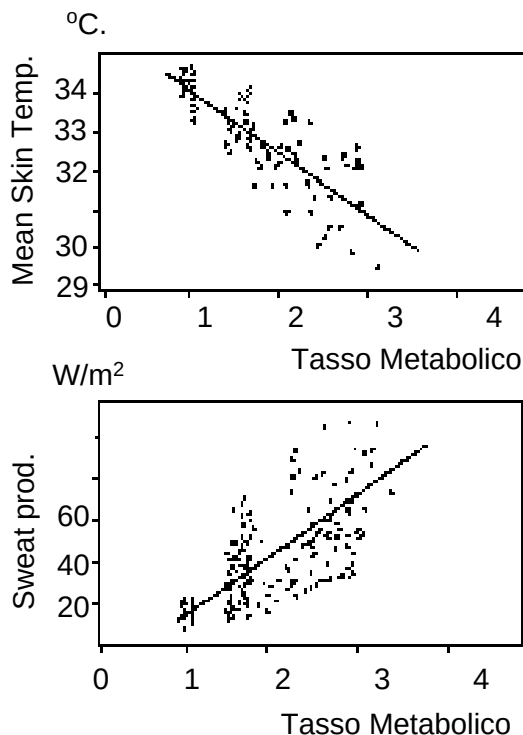
- Scambio termico “secco” (**sensibile**), $R + C$
 - tramite lo scambio termico convettivo e radiativo
 - perdite termiche per radiazione se la temperatura della pelle è **MAGGIORE** della **temperatura delle superfici dell'ambiente**
 - perdite termiche per convezione se la temperatura della pelle è **MAGGIORE** della **temperatura dell'aria** (temperatura a bulbo secco)
 - **temperatura media radiante** (T_r)

è quella temperatura uniforme di un immaginaria cavità nera che causa le stesse perdite termiche per radiazione che si hanno nell'ambiente reale



Parametri influenzanti il bilancio termico di una persona

- Gli scambi termici **sensibili** ($R+C$) rappresentano il ~70% per basse resistenze termiche del vestiario e il ~60% per valori elevati.
- Lo scambio termico **latente** per traspirazione/sudorazione (E) rappresenta il ~25% per attività moderate
- Gli scambi termici per conduzione (K) and respirazione (Res) sono normalmente insignificanti se confrontati con lo scambio termico complessivo.
- L'interazione meccanica (W), causata un'efficienza meccanica ($< 20\%$) rappresenta solo qualche %.



- Per mantenere il comfort termico devono essere soddisfatte due condizioni:
 - il calore prodotto deve eguagliare le perdite termiche
 - i segnali dai sensori di caldo e freddo si devono neutralizzare vicendevolmente
- La produzione di sudore è utilizzata al posto della temperatura interna corporea come misura della sollecitazione termica calda
- La relazione tra i parametri è stata ricavata sperimentalmente
- Non è stata presa in considerazione alcuna differenza tra sesso, età, razza o origini geografiche



Equazioni del benessere - Norma UNI EN ISO 7730

$$\frac{dU}{dt} = \sum \Phi_i - W \quad \longrightarrow \quad C_{cu} \frac{d\langle T_{cu} \rangle}{dt} = A_{pelle} \{M - H - E_c - C_{res} - E_{res} - W\} = A_{pelle} \{M - W - \phi_T\}$$

Ipotesi "Benessere" $\langle T_{cu} \rangle \cong 37^\circ\text{C} = \text{costante} \quad \longrightarrow \quad \{M - H - E_c - C_{res} - E_{res} - W\}_{\text{benessere}} = 0$

con

$$H = R + C = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_{cl} \cdot f_{cl} \cdot \left[(g_{cl} + 273)^4 - (\bar{g}_r + 273)^4 \right] + f_{cl} h_c (g_{cl} - g_a)$$

$$E_c = 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot \left[5733 - 6.99 (M - W - p_v^{(H_{20})}) \right] + 0.42 \cdot (M - W - 58.15)$$

$$C_{res} = 0.0014 \cdot M \cdot (34 - g_a) \quad E_{res} = 1.72 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_v^{(H_{20})})$$

$$g_{cl} \cong g_{cl,eq} = g_{sk,eq} - I_{cl} \cdot H = [35.7 - 0.028 \cdot (M - W)] - I_{cl} \cdot H$$

M	Flusso metabolico
H	Scambio termico sensibile (R+C)
E _c	Scambio termico latente sulla pelle
C _{res}	Scambio termico sensibile respiratorio
E _{res}	Scambio termico latente respiratorio
W	Potenza meccanica specifica
I _{cl}	Resistenza termica del vestiario
h _c	Coeff. scambio termico convettivo; h _c = f(v)

f _{cl}	Fattore di vestiario
ε _{cl}	Emissività vestiario = 0.7
g _{cl}	Temperatura vestiario [°C]
g _{sk,eq}	Temperatura pelle equilibrio [°C]
g _a	Temperatura aria [°C]
g _r	Temperatura media radiante [°C]
p _v ^(H₂O)	Pressione parziale vapore in aria
v	Velocità dell'aria



Lo scambio termico convettivo-radiativo può essere riscritto come:

$$H = R + C = f_{cl} \cdot \{h_r (\vartheta_{cl} - \overline{\vartheta}_r) + h_c (\vartheta_{cl} - \vartheta_a)\} = \\ = f_{cl} \cdot h_{cr} (\vartheta_{cl} - \vartheta_{operativa})$$

avendo definito $\overline{\vartheta}_r = \sqrt[4]{\overline{T}_r} - 273.15$

$$h_r = \frac{\varepsilon_{cl} \sigma (T_{cl}^4 - \overline{T}_r^4)}{\vartheta_{cl} - \overline{\vartheta}_r} \quad \text{coeff. scambio termico radiativo}$$

$$h_{cr} = h_r + h_c \quad \text{coeff. scambio termico misto C-R}$$

$$\vartheta_o = \frac{h_r \cdot \overline{\vartheta}_r + h_c \cdot \vartheta_a}{h_r + h_c} \quad \begin{array}{l} \text{temperatura OPERATIVA} \\ \text{(legame tra } \vartheta_r \text{ e } \vartheta_a) \end{array}$$

ambiente
corpo umano



$$f(M, W, I_{cl}, \vartheta_a, \overline{\vartheta}_r, v, p_v^{(H_2O)}) = 0$$

L'equazione del benessere include i tre parametri personali (M, W, I_{cl}) e quattro parametri ambientali ($\vartheta_a, \overline{\vartheta}_r, v, p_v^{(H_2O)}$)

Fissati i parametri personali, vi sono 3 gradi di libertà !

... cioè una qualsiasi combinazione di 3 parametri ambientali su 4 soddisfa l'equazione del benessere;

$$f_1(\vartheta_a, \overline{\vartheta}_r, v, p_v^{(H_2O)}) = 0$$

ovvero:

$$f_2(\vartheta_a, \vartheta_o, v, p_v^{(H_2O)}) = 0$$

$$f_3(\vartheta_o, \overline{\vartheta}_r, v, p_v^{(H_2O)}) = 0$$

se si usa la temperatura operativa



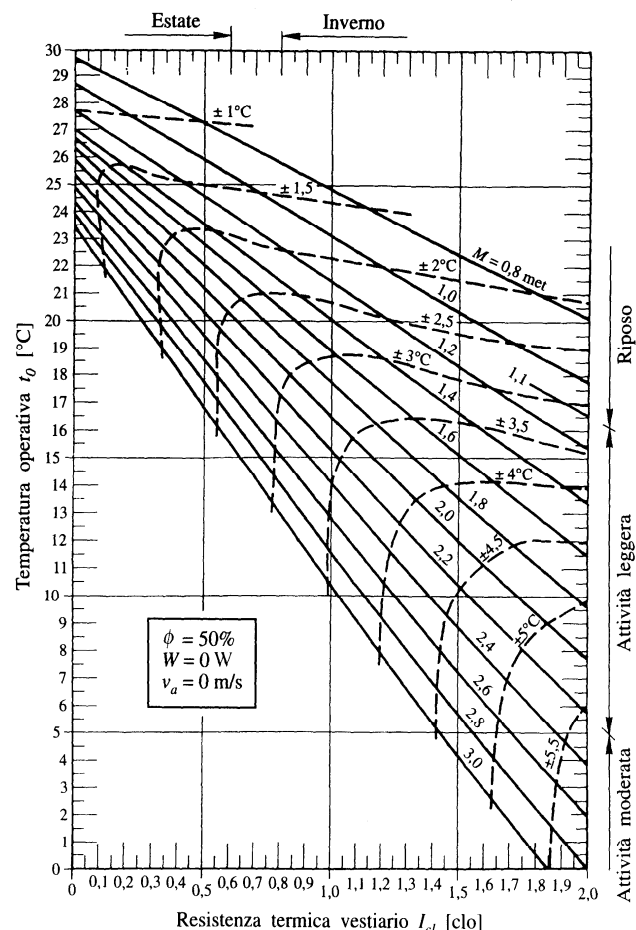
- L'equazione precedente, ricavata da Fanger, è complessa
 - ma può essere trasformata in comodi diagrammi (diagrammi di comfort)
 - può essere impiegata per definire e ricavare tre indici del benessere:
 - il voto medio previsto (PMV)
 - la percentuale prevista di insoddisfatti (PPD)
 - la più bassa percentuale possibile di insoddisfatti (LPPD)



Diagrammi di comfort

Curve continue:
neutralità termica
(PMV=0) funzione
di t_0 , I_{cl} e M.

Curve tratteggiate:
scostamento
accettabile
($0.50 < PMV < 0.50$)
di T operativa t_0 .





PMV

- è una funzione complessa dei 2 + 4 parametri del comfort
- Rappresenta il valore medio predetto dal giudizio soggettivo di un gruppo di persone in un dato ambiente

PPD

- determinato dal PMV come misura quantitativa del comfort termico
- “insoddisfatti” vuol dire non votanti -1, +1 o 0 nel PMV
- normalmente $PPD < 7.5\%$ in ogni posizione e $LPPD < 6\%$



Relazione Sensazione – Fenomeno: *PMV*

Predict Mean Vote (*Fanger*)



$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \cdot TL$$

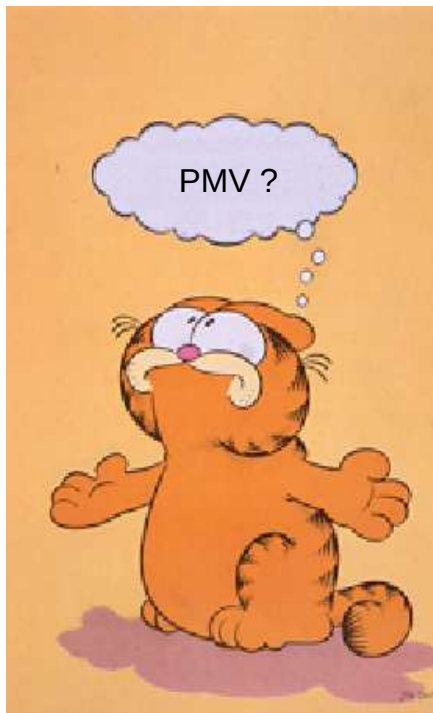
e

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2719PMV^2)}$$

con

$$\varphi_T = H + E_c + C_{res} + E_{res}$$

$$TL = \{\varphi_T\}_{benessere} - \{\varphi_T\}_{condizioni\ attuali} = (M - W) - \{\varphi_T\}_{condizioni\ attuali}$$



$$PMV = (0,303e^{-2,100 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M-W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}]$$

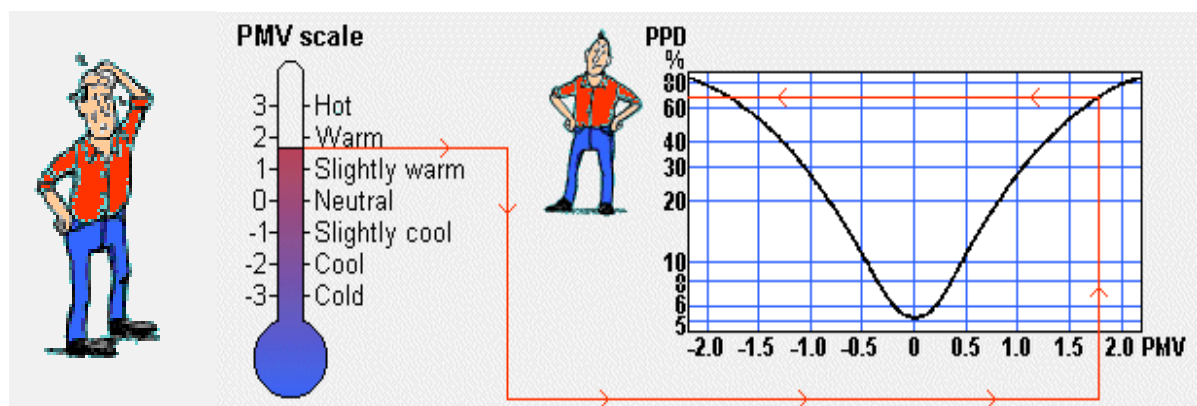


$$PMV = (0,303e^{-2,100 \cdot M} + 0,028) \cdot [58,15 \cdot (M-W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 406,7 \cdot (M-W) - p_a] - 24,21 \cdot [(M-W) - 1] - 10^{-3} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0814 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{eq} + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_{c,eq} \cdot (t_{cl} - t_{eq})]$$

$$h_{c,eq} = 2,38 \cdot (t_{cl} - t_{eq})^{0,25} \quad f_{cl} \begin{cases} 1,00 + 0,2 \cdot I_{cl} & \text{for } I_{cl} < 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,1 \cdot I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \end{cases}$$

M [MET]

I_{cl} [CLO]



- L'indice PMV (Voto medio previsto) predice la classificazione soggettiva dell'ambiente da parte di un gruppo di persone
- L'indice PPD predice il numero di persone insoddisfatte



Dall'equazione del benessere e dalla relazione *PMV-TL* si ricava :

➤ ***U.R.*** $\cong 50\%$ ($\propto p_v^{(H_2O)}$)

➤ ***v_{aria}*** < 0.15 m/s

che si ha benessere termico, se si ha :

$$\vartheta_o = \frac{h_r \cdot \overline{\vartheta_r} + h_c \cdot \vartheta_a}{h_r + h_c} \bigg|_{\text{corpo umano}}^{\text{ambiente}} \cong 20^\circ\text{C} \quad \text{vestiario invernale}$$

$$\vartheta_o \cong 25^\circ\text{C} \quad \text{vestiario estivo}$$

occorre controllare la temperatura OPERATIVA



Fattori ambientali:

- Temperatura a bulbo secco (correlata anche all'umidità)
- Umidità relativa (o pressione parziale del vapore d'acqua)
 - influenza le perdite evaporative e la non bagnabilità della pelle
 - usualmente UR tra 30% e 70% è accettabile
- Velocità aria (incrementa le perdite convettive)
 - preferibili velocità < 0.15 m/s
- Temperatura media radiante
 - La radiazione ha un grosso impatto sul comfort



Altri fattori che influenzano il comfort:

✎ età

- ✎ Sensazioni diverse tra persone giovani e anziane

✎ adattabilità

- ✎ Le persone che vivono in climi tiepidi potrebbero adattarsi meglio ad ambienti caldi

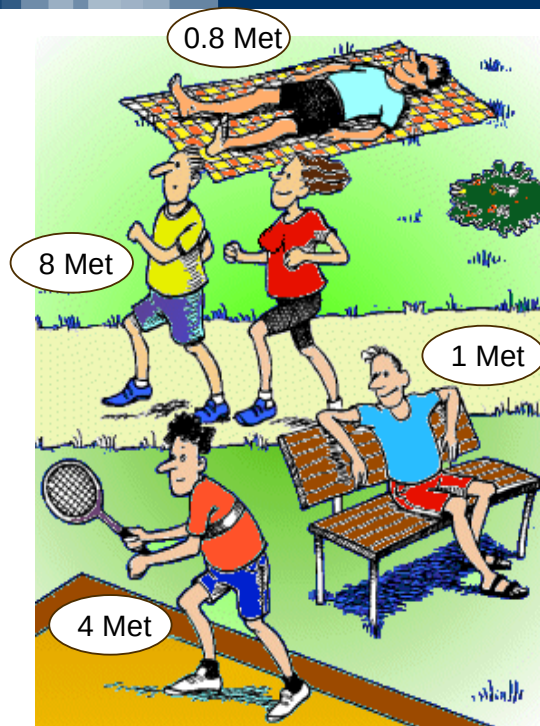
✎ sesso

- ✎ donne: temperatura pelle più bassa, perdite evaporative e tasso metabolico più bassi
- ✎ Vestiario e temperature preferite



Parametri da stimare e calcolare sono:

Met	Stima del flusso metabolico
Clo	Calcolo della resistenza del vestiario



L'energia rilasciata dal metabolismo dipende dall'attività muscolare.

Metabolismo è misurato in Met (1 Met=58.15 W/m² di superficie corporea).

La superficie corporea per un adulto normale è di 1.7 m².

Una persona seduta in condizioni di comfort ha una perdita termica di 100 W.

A causa della capacità termica del corpo umano, per definire il flusso metabolico si dovrebbe utilizzare il livello di attività media nelle ore significative



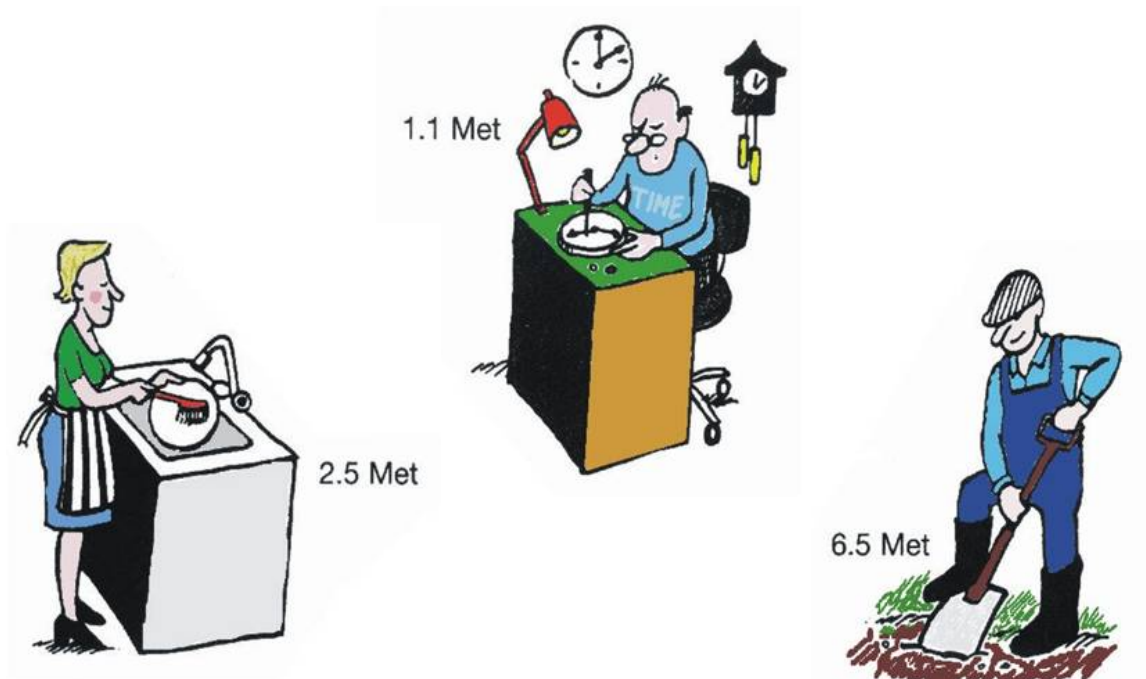
Tabella Valori Flusso Metabolico

Attività	Tasso metabolico [W/m ²]	Tasso metabolico [met]
A riposo		
Disteso, sonno	40	0,7
Seduto, rilassato	58	1,0
In piedi, rilassato	70	1,2
Trasporti		
Conducente auto	80	1,4
Pilota aereo	100	1,7
Camminata normale (1 m/s)	120	2,1
Camminata veloce (1,8 m/s)	220	3,8
Attività d'ufficio		
Lettura, studio	55	0,9
Uso Computer	65	1,1
Attività di segreteria	75	1,3
Occupazioni diverse		
Cucina	100	1,7
Commessa	110	1,9
Lavoro domestico	150	2,6
Lavoro leggero a una macchina	125	2,1
Lavoro pesante a una macchina	235	4,0
Tempo libero		
Ballo	160	2,7
Tennis	250	4,3
Basket	350	6,0



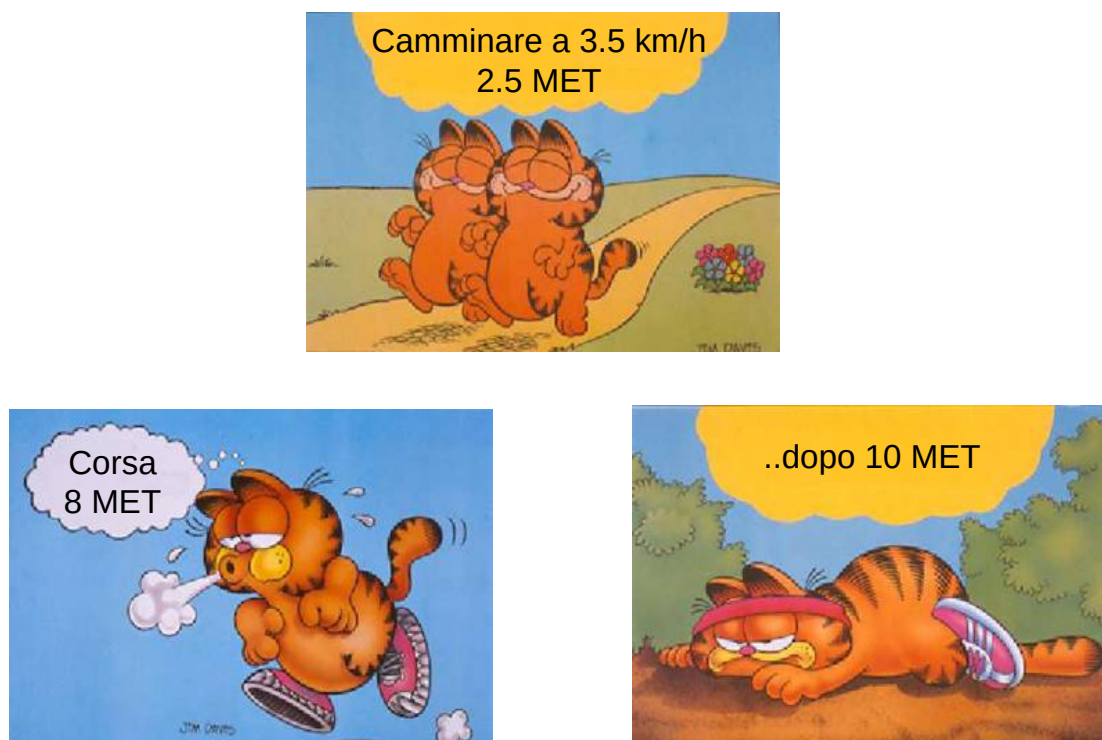
Esempi Valori di Met

35



Esempi Valori di Met

36





- 1 Clo = Valore di isolamento pari a $0,155 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$



Tabella resistenza termica vestiario

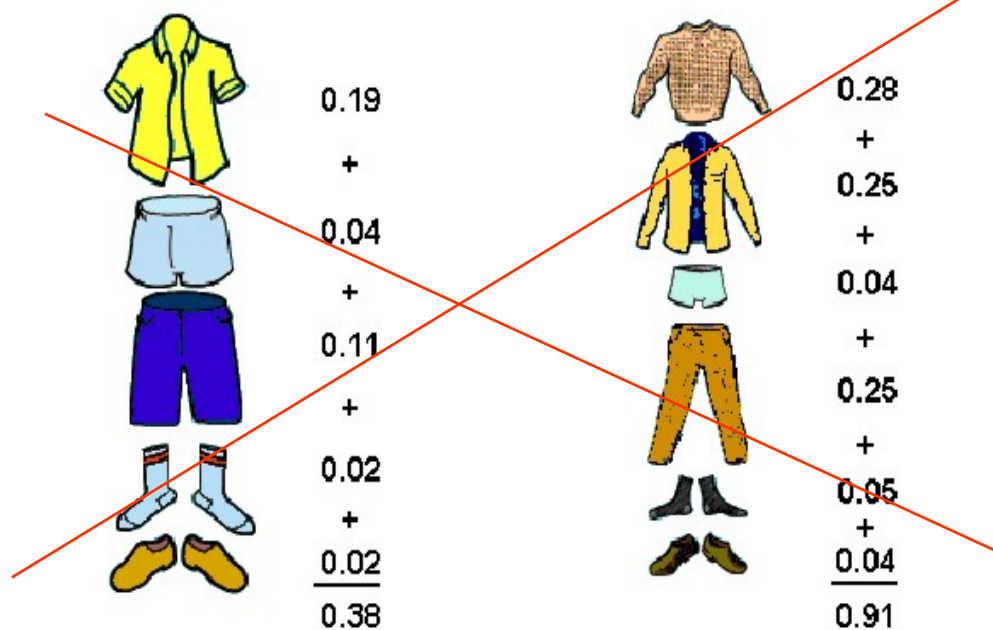
Abbigliamento (da Norma ISO 7730)	Resistenza termica I _{cl} [m ² K / W]	Resistenz a termica I _{cl} [clo]
Nudo	0,000	0,00
Abbigliamento estivo		
Slip, maglietta, pantaloncini, calzini, sandali	0,050	0,30
Mutande, camicia maniche corte, pantaloni leggeri, calze, scarpe	0,080	0,50
Slip, calze lunghe, camicia maniche corte, gonna, sandali	0,085	0,55
Abbigliamento sportivo		
Maglieria intima, completo da corsa, calze lunghe, scarpe tennis	0,115	0,75
Abbigliamento leggero da lavoro		
Maglieria intima, camicia, pantaloni, calze scarpe	0,120	0,80
Abbigliamento da ufficio		
Maglieria intima, pantaloni, camicia, giacca, calzini, scarpe	0,155	1,00
Maglieria intima, calze lunghe, camicia, gonna, gilet, giacca	0,155	1,00
Abbigliamento invernale		
Maglieria intima, pantaloni, camicia, gilet, giacca, soprabito, calze, scarpe	0,230	1,50



Calcolo della resistenza totale in (Clo)

39

Isolamento per l'intero vestiario $I_{cl} = \sum I_{clu}$

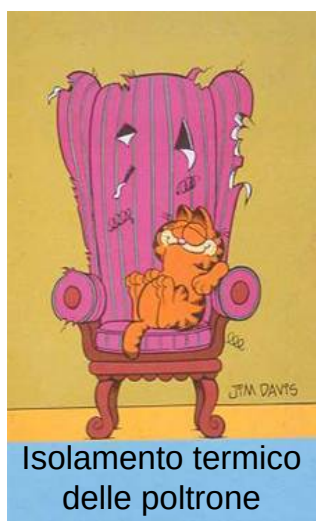


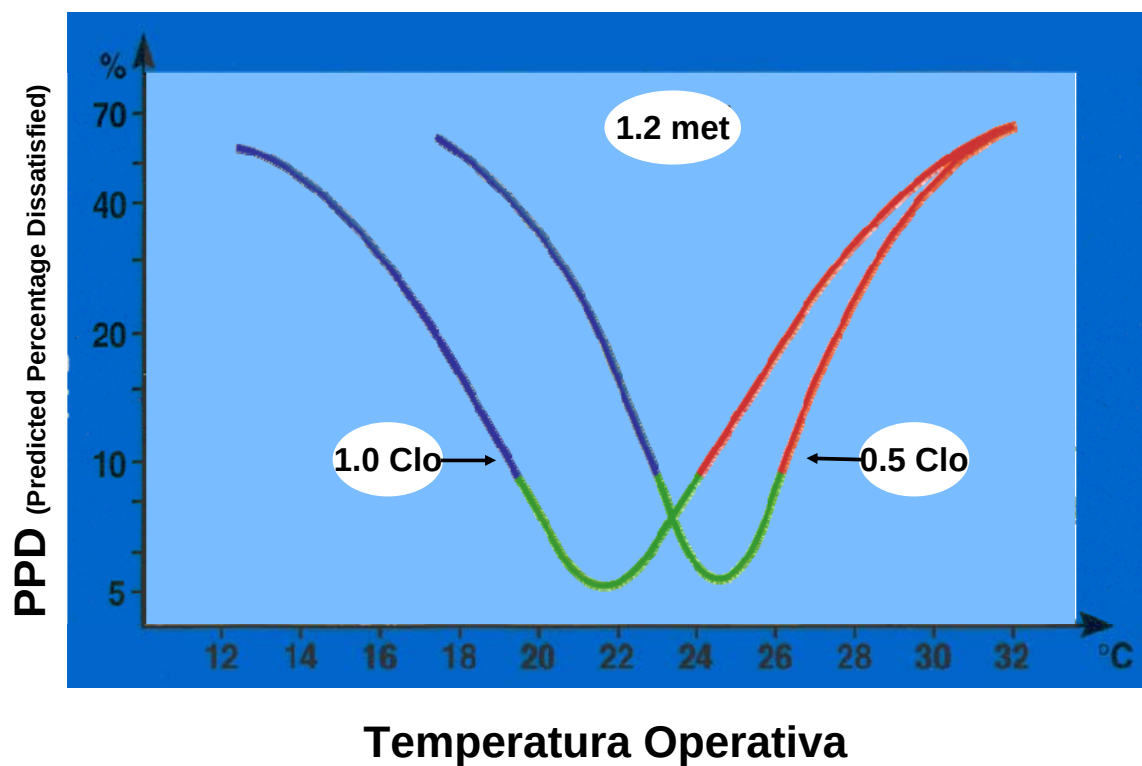
Le resistenze areiche si sommano solo se in serie!



Localizzazione del valore dell'isolamento termico

40







Cosa occorre misurare?

43

I parametri da misurare sono:

- ϑ_a Temperatura dell'aria
- ϑ_r Temperatura media radiante
- v_a Velocità dell'aria
- p_v Umidità (pressione parziale vapore)



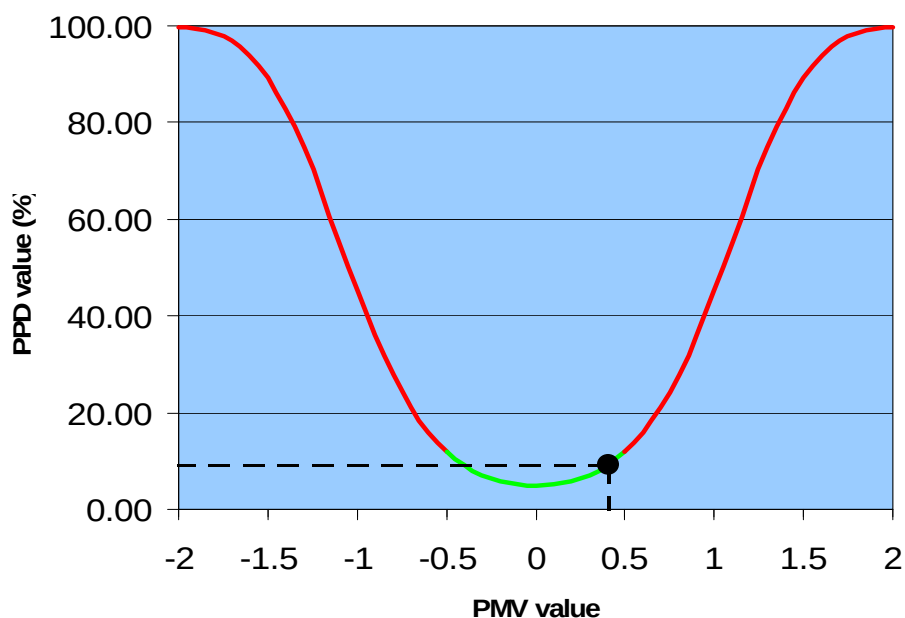
Calcolo di PMV e PPD

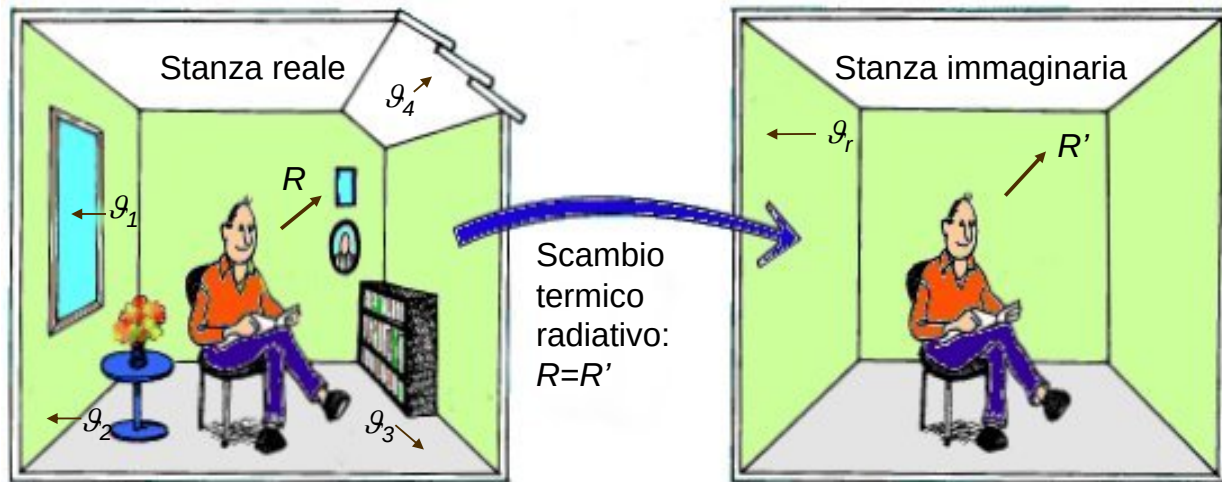
44

Parameter	Input
Clo value	1
Met value	1
T_{eq}	24
RH	70

Calculate PMV

PMV	0.41
PPD	9





La temperatura media radiante è quella temperatura di un ambiente ipotetico nero con il quale la persona scambi lo stesso flusso termico per radiazione che scambia con l'ambiente reale.

Misurare tutte le temperature superficiali e calcolare tutti i fattori di forma comporta dispendio di tempo. Di conseguenza si cerca di evitare l'uso della temperatura media radiante quando possibile..



Fattori di forma

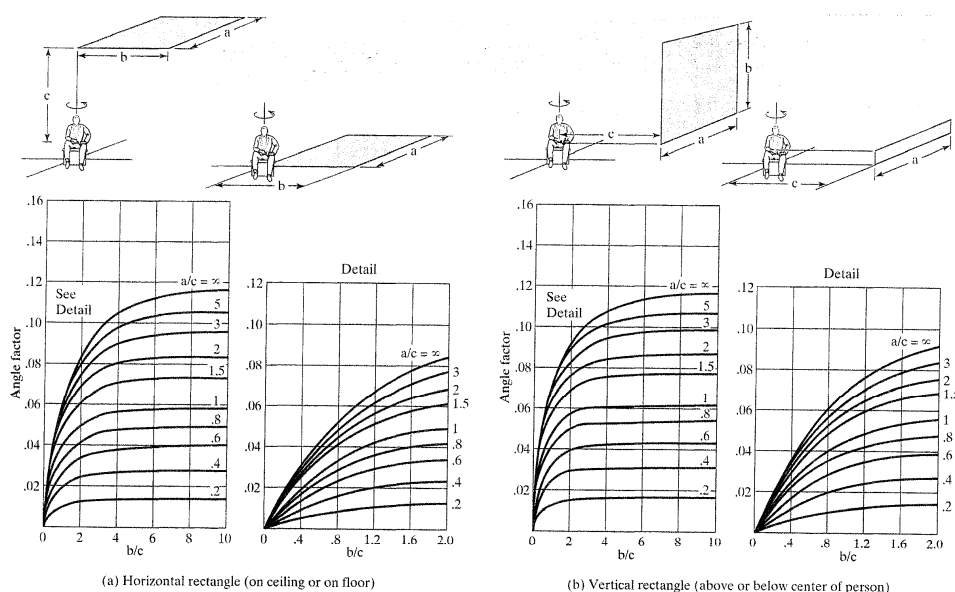


Figure 12.2 Mean value of angle factor between seated person and horizontal or vertical rectangle when person is rotated about the vertical axis. [Reprinted by permission from ASHRAE Fundamentals 1993 (IP & SI), p. 8.12.]



Indici ambientali

- Esprimono il comfort termico con un valore unico combinando 2 o più parametri tra loro
- Temperatura operativa , ϑ_o**
 - Temperature uniforme di un ambiente immaginario con lo stesso scambio termico sensibile $R + C$ che si ha nell'ambiente reale
 - Media pesata di ϑ_a and ϑ_r :

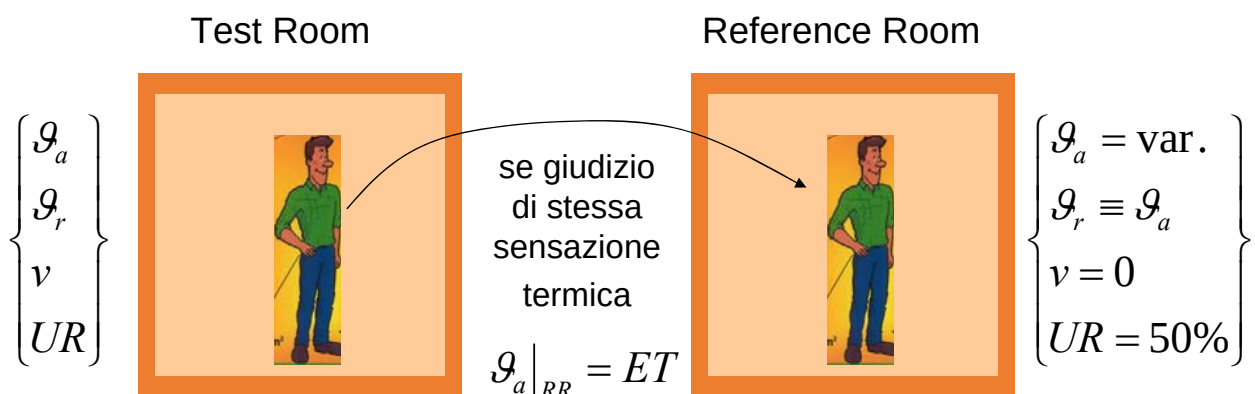
$$\vartheta_o = \frac{h_r \cdot \vartheta_r + h_c \cdot \vartheta_a}{h_r + h_c}$$



Indici ambientali

Temperatura Effettiva, ET

- Temperatura di un ambiente con 50%UR, $v=0$ e $\vartheta_a = \vartheta_r$ che comporti per il corpo umano lo stesso scambio termico che si ha nell'ambiente reale
- Indice introdotto dalla Norma ASHRAE 55-92





Zone di comfort sul diagramma psicrometrico

- definite usando isoterme parallele alla ET
- Zone di comfort ASHRAE per estate e inverno (per applicazioni tipiche da ufficio)
- **zone di comfort** proposte
 - da 5 to 16 mm Hg di pressione parziale del vapore
 - per l'estate, $22.8\text{ °C} \leq \text{SET} \leq 26.1\text{ °C}$
 - per l'inverno, $20.0\text{ °C} \leq \text{SET} \leq 23.9\text{ °C}$



Zona di Comfort ASHRAE

$M \leq 1.2\text{ met}$

$v_a < 0.15\text{ m/s}$

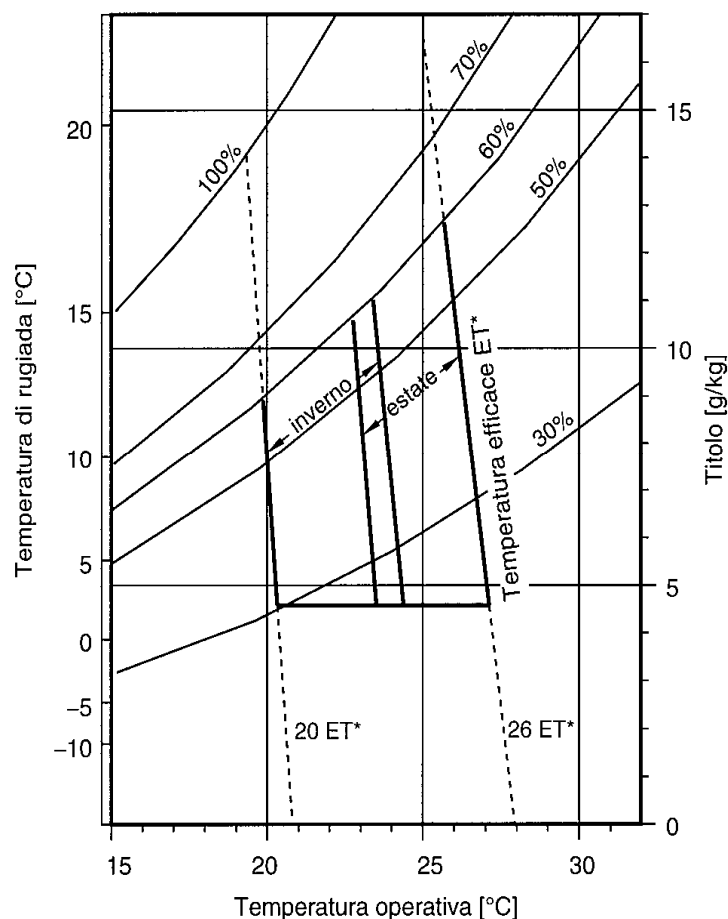
Res. vestiario:

- inverno

$$I_{cl} = 0.9\text{ clo}$$

- estate

$$I_{cl} = 0.5\text{ clo}$$





Nella regione interna la percezione è di un ambiente neutrale (valore 0 di PMV) o molto vicino alla neutralità. Nelle zone estreme di confine la sensazione delle persone si discosta di 0.5 dalla neutralità $PMV=0$.

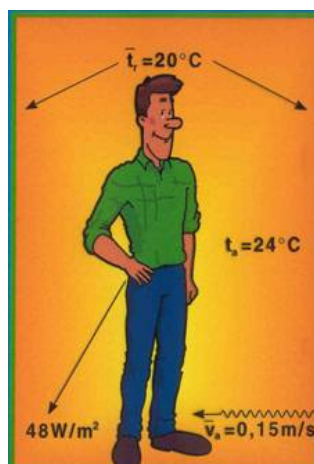
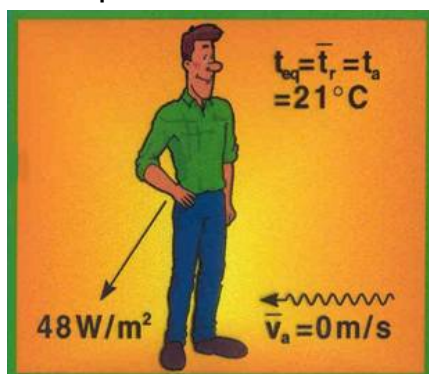
I confini termici possono essere modificati con una diminuzione di $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ per ogni incremento di 0.1 *clo* di resistenza termica del vestiario e viceversa. Analogamente ci può essere un decremento di $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ per ogni incremento di 1.4 *met* di attività.

I confini con le zone ad alta e bassa umidità sono poco precisi. Il confine a bassa umidità (30%) può portare a secchezza della pelle o delle mucose facciali a seconda del soggetto. Viceversa verso il confine di alta umidità (60%) ci può essere la fastidiosa presenza di sudore sulla pelle.

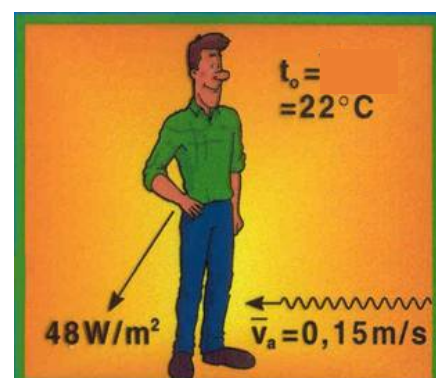


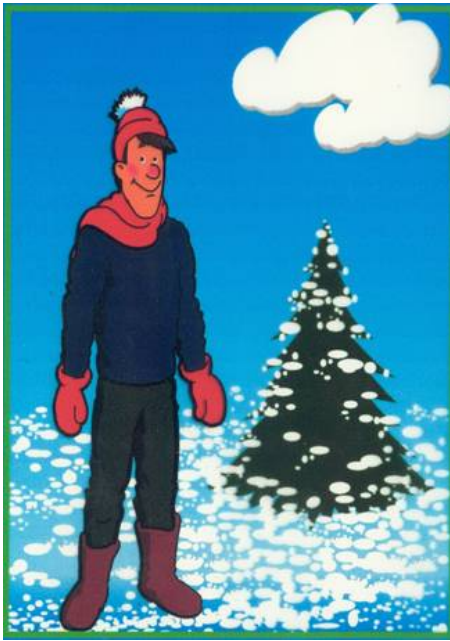
Temperatura Operativa and Effettiva

Temperatura Effettiva

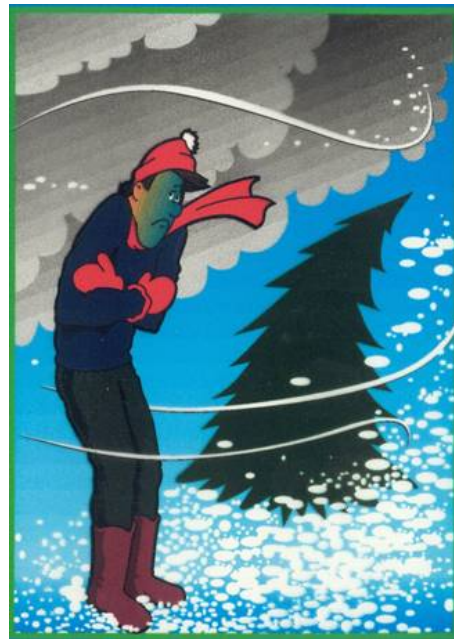


Temperatura Operativa

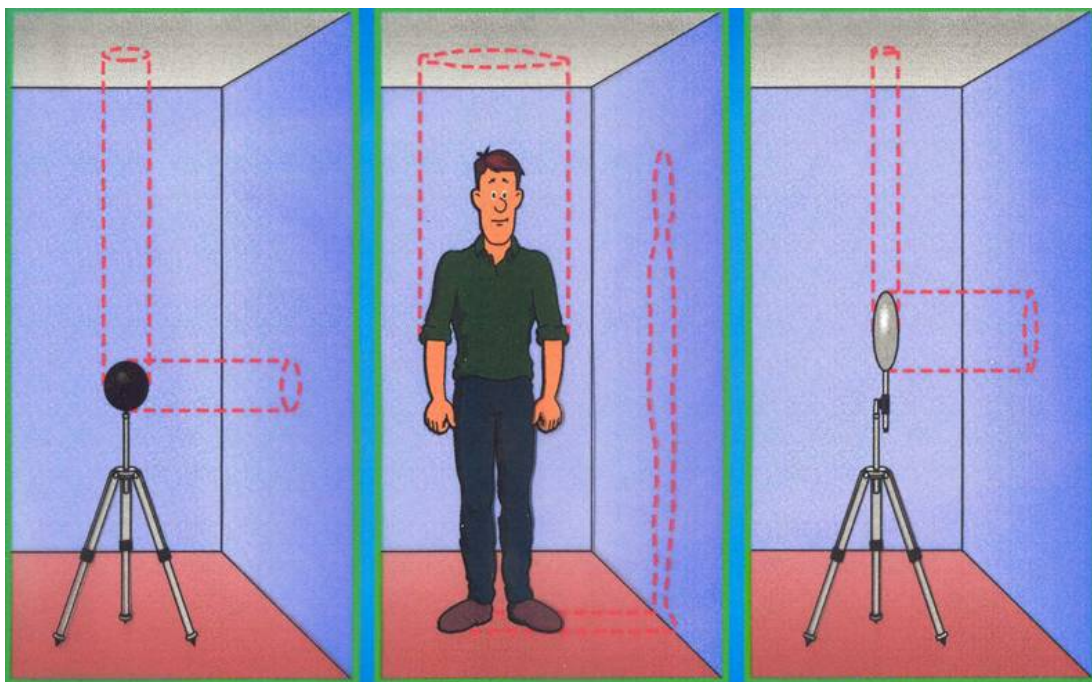




Temperatura Operativa



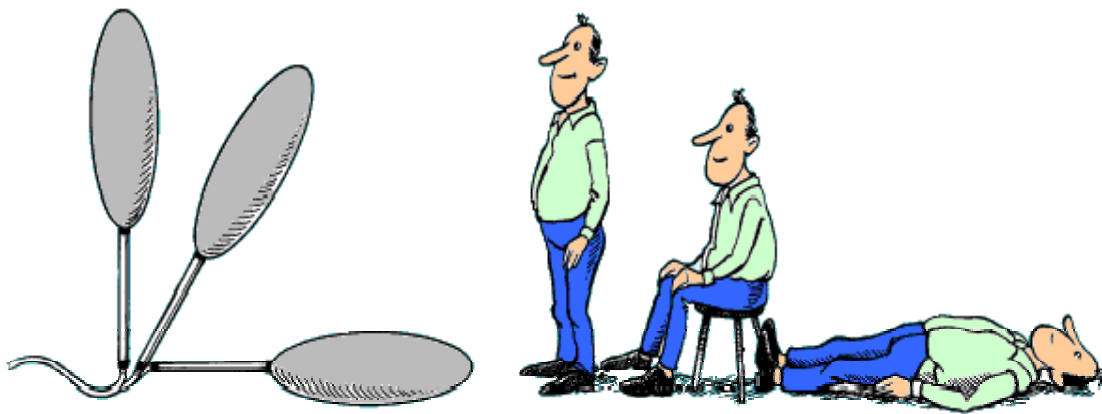
Temperature Effettiva



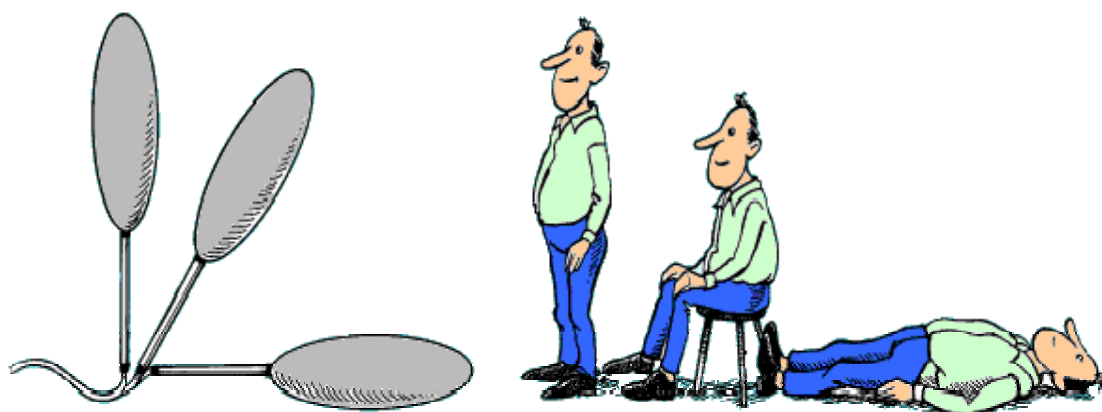
$$\bar{\theta}_r = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{\theta}_p = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\bar{\theta}_r = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$



- La temperatura operativa ϑ_o integra gli effetti di ϑ_a e ϑ_r
- Un sensore per la misura della temperatura operativa deve avere le stesse proprietà di scambio termico di un manichino non riscaldato.



- Le perdite termiche sensibili o la temperatura effettiva possono essere misurate direttamente impiegando un trasduttore a fusso di temperatura operante.
- La temperatura effettiva integra gli effetti di ϑ_a , ϑ_r and v_a
- Il trasduttore per la misura delle perdite termiche sensibili è riscaldato alla stessa temperatura della superficie del vestiario della persona.



Temperatura di Comfort

57



1,7 CLO
2,5 MET
RH=50%
 $t_{co}=6^{\circ}\text{C}$.



0,8 CLO
2,2 MET
RH=50%
 $t_{co}=18^{\circ}\text{C}$.



0,5 CLO
1,2 MET
RH=50%
 $t_{co}=24,5^{\circ}\text{C}$.



Malessere Termico Localizzato

58



Correnti
d'aria

V_{aria}



Asimmetria
Radiante

Δg_w



Differenze
verticali nella
temperatura
dell'aria

Δg_a



Temperatura
pavimento

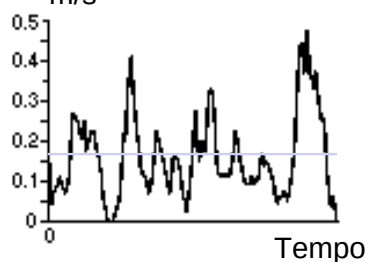
g_p



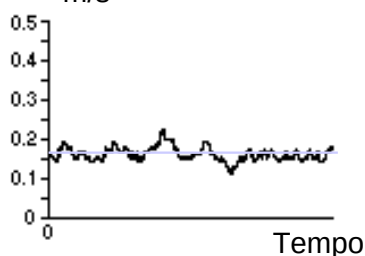
Spifferi

59

Velocità
m/s



Velocità
m/s



Gli spifferi sono presenti nella maggior parte delle lamentele sul comfort.

Ciò che è percepito è la perdita termica.

La perdita termica dipende dalla velocità dell'aria e dalla turbolenza

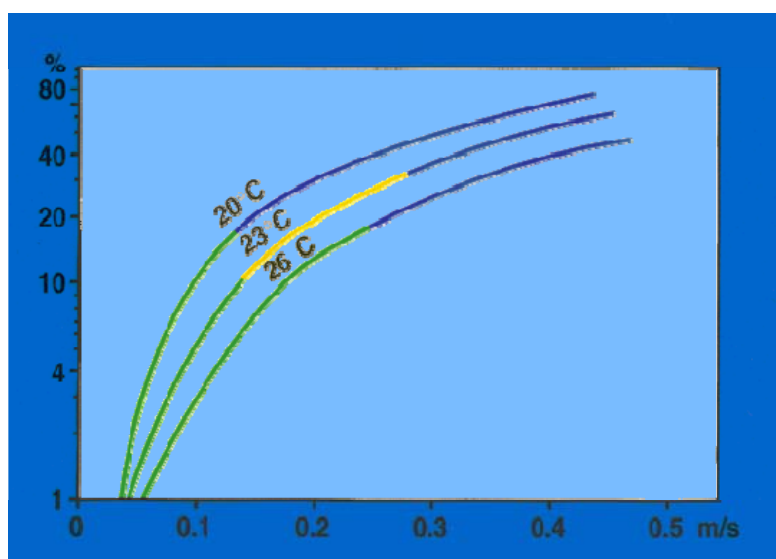
Maggiore è la turbolenza, maggiore è il malessere anche a parità di perdite termiche



Spifferi

60

Dissatisfied



Velocità media dell'aria

La percezione degli spifferi dipende dalla temperatura dell'aria.

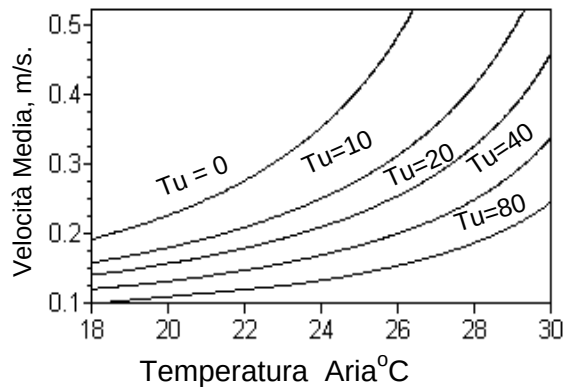
La percentuale di insoddisfatti cresce al ridursi della temperatura dell'aria.



Valutazione velocità degli spifferi

61

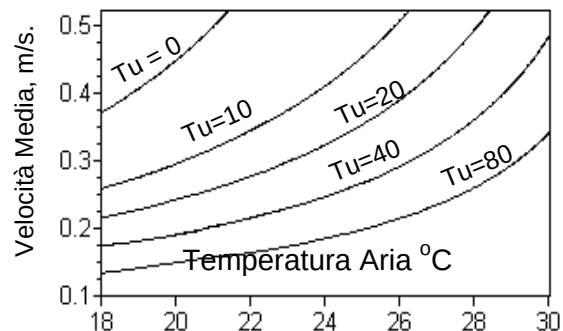
15% insoddisfatti



Le fluttuazioni nella velocità dell'aria sono descritte tramite l'Intensità di Turbolenza (Tu).

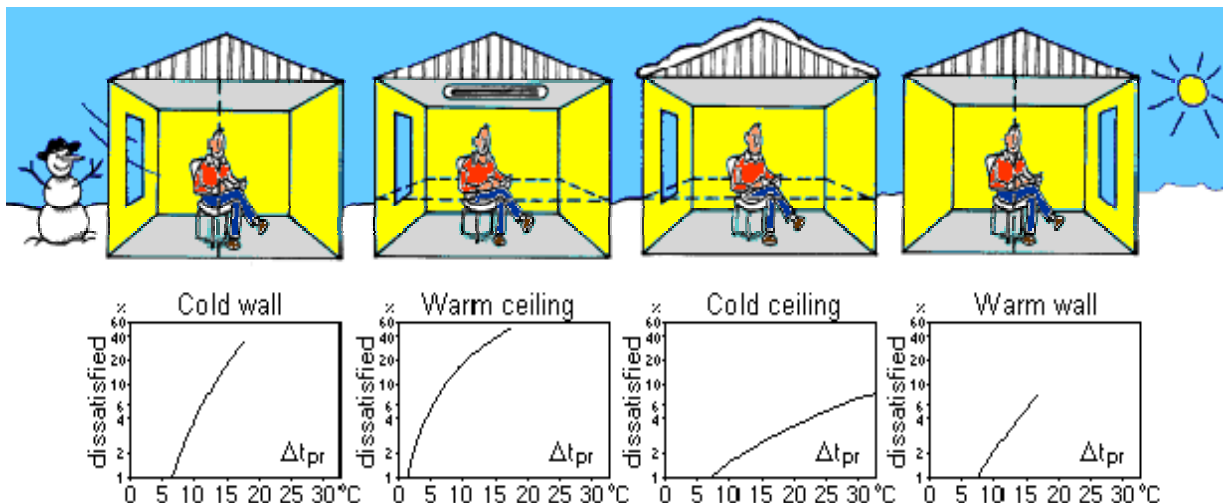
L'equazione che fornisce la velocità è basata sullo studio di 150 persone, ed è riportata nella ISO 7730.

25% insoddisfatti



Asimmetria Radiante

62

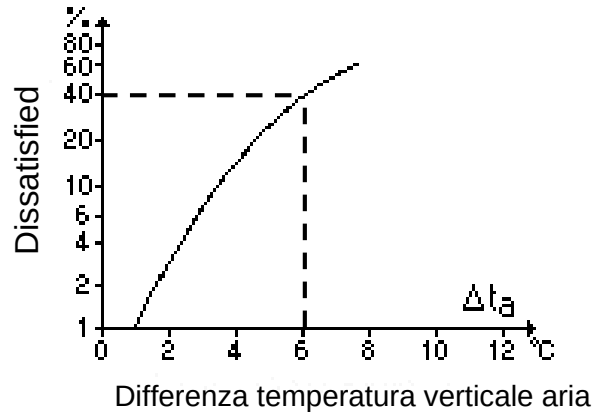
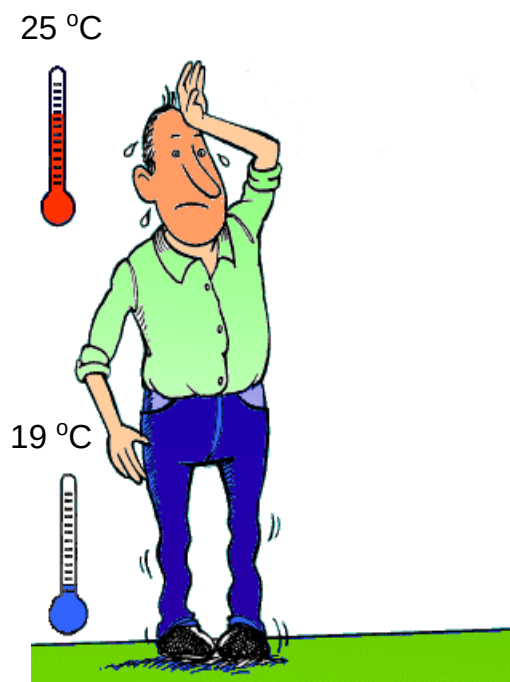


L'asimmetria termica radiante è percepita come un fastidio.

Soffitti caldi e pareti fredde causano i fastidi maggiori.



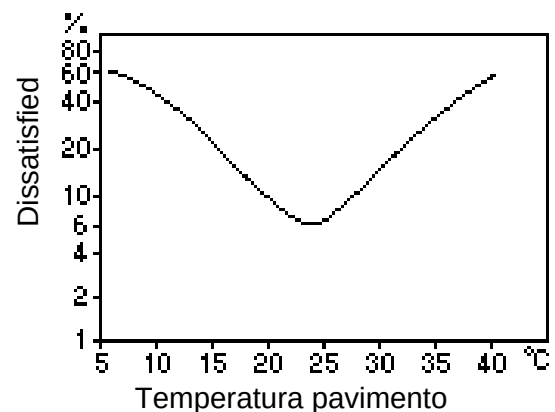
Differenza di Temperatura Verticale dell'Aria⁶³



La differenza di temperatura verticale dell'aria è la differenza tra la temperatura dell'aria a livello del collo e delle caviglie

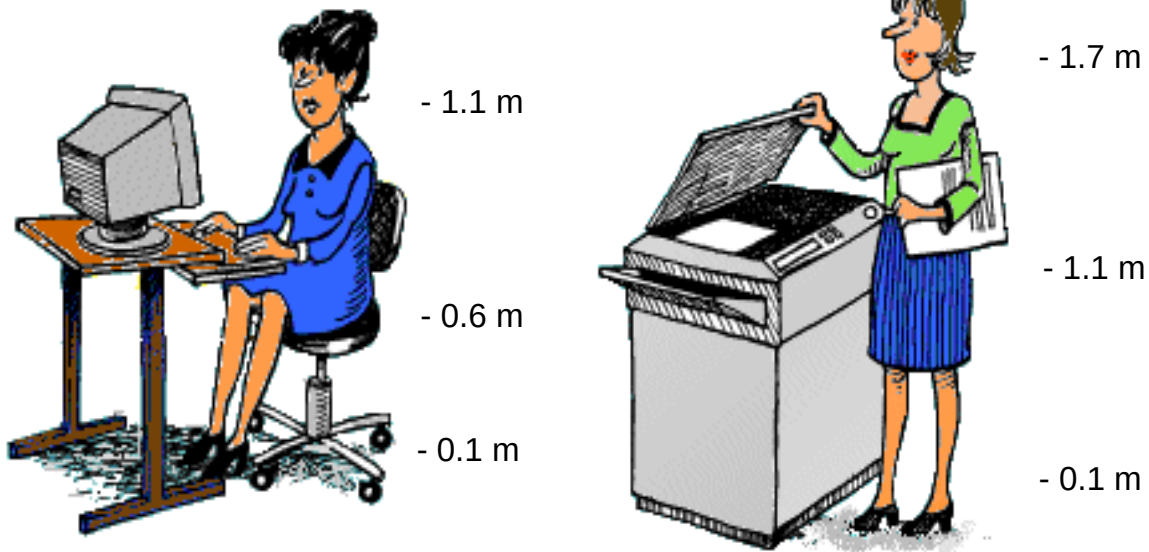


Temperatura del pavimento⁶⁴



Temperature del pavimento accettabili: da 19 a 29 °C.

Il grafico è costruito con l'ipotesi che le persone indossino "pantofole normali".



- Misure per la differenza verticale di temperatura e correnti d'aria alle caviglie e al collo.
- Le altre misure dovrebbero essere eseguite rispetto al centro di gravità della persona.



Trasduttori

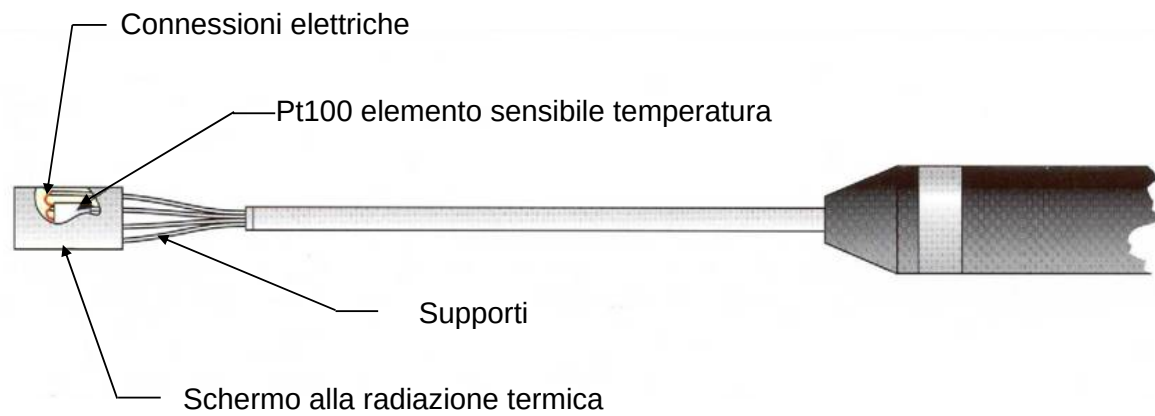
- Temperatura operativa
- Velocità dell'aria
- Temperatura media radiante
- Asimmetria radiante
- Temperatura dell'aria
- Umidità
- Temperature superficiali
- WBGT
- Perdite termiche sensibili





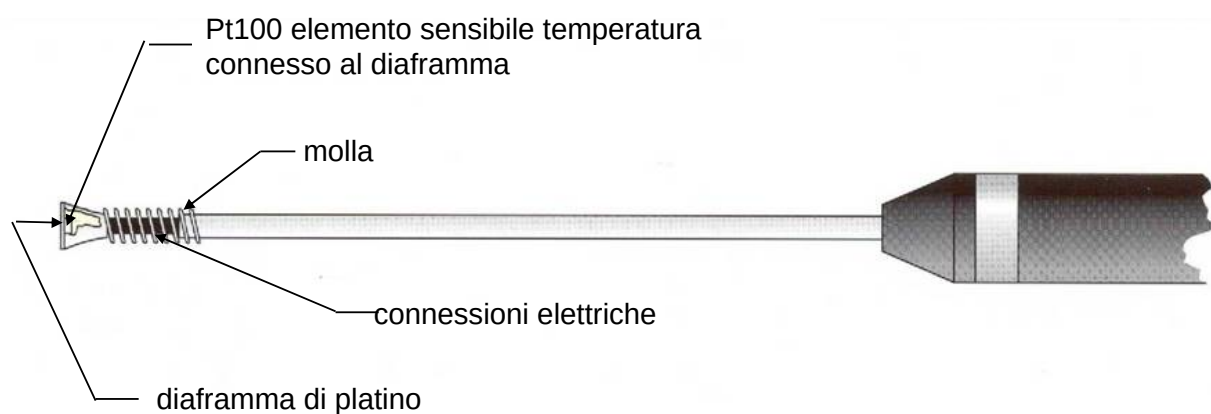
Trasduttore Temperatura Aria

67



Trasduttore Temperatura Superficiale

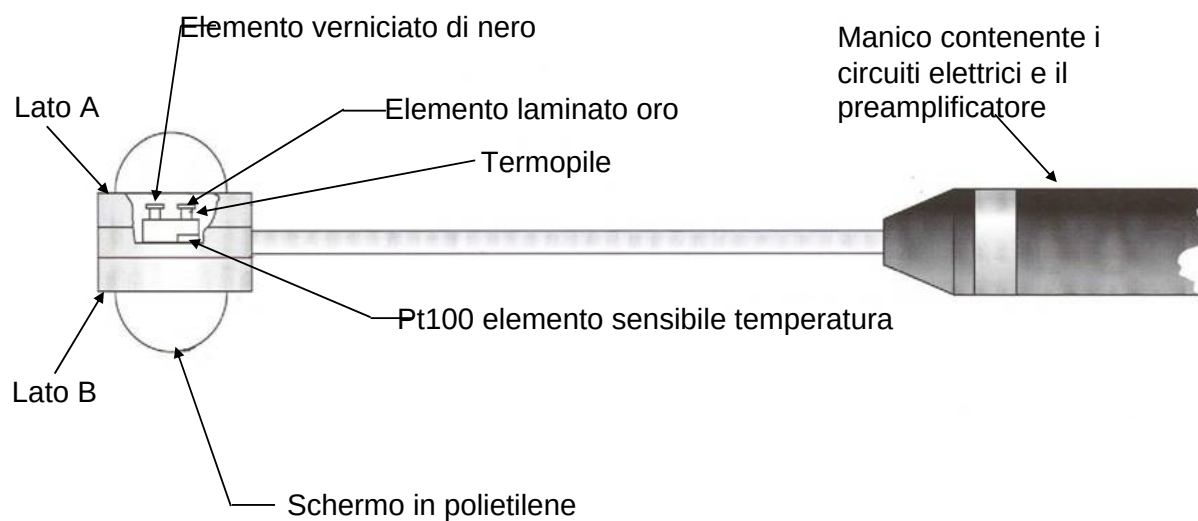
68





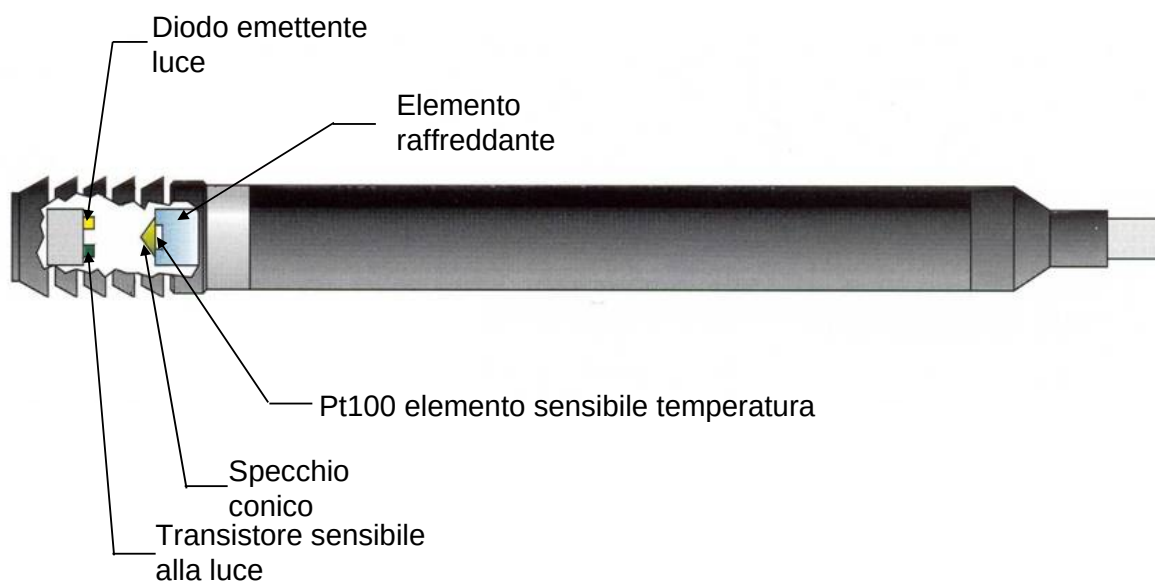
Trasduttore asimmetria radiante

69



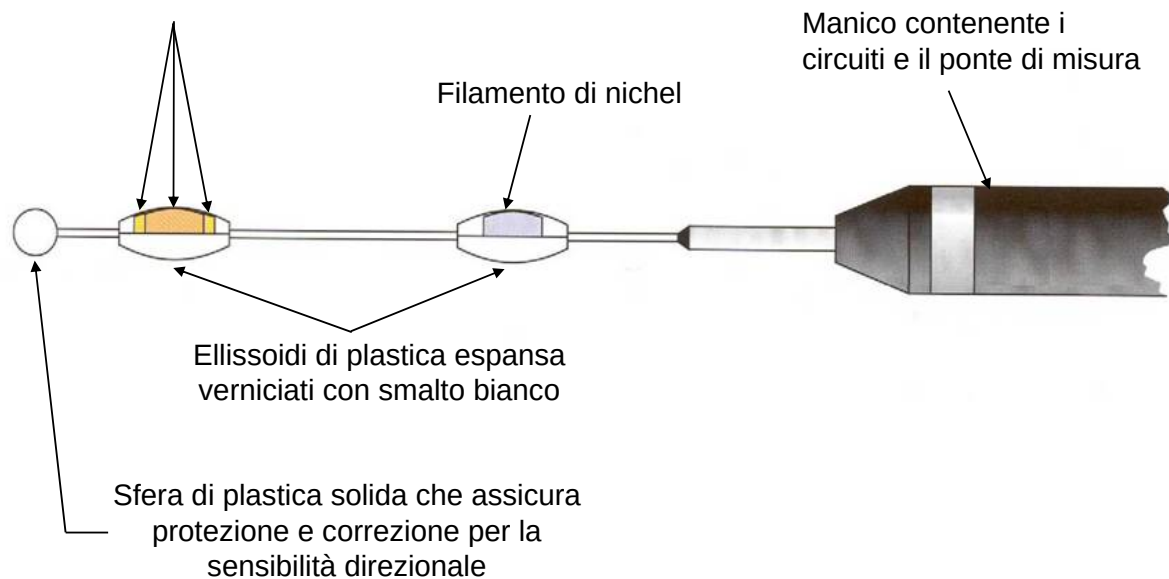
Trasduttore Umidità

70





The filamenti riscaldati.

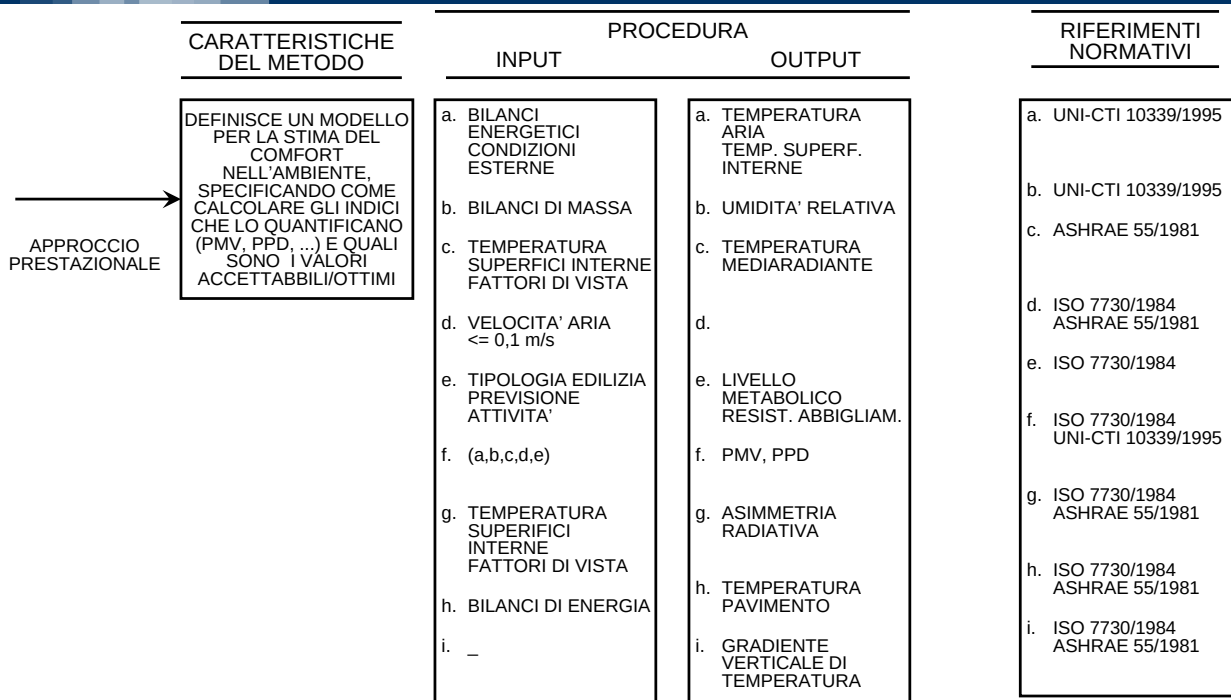
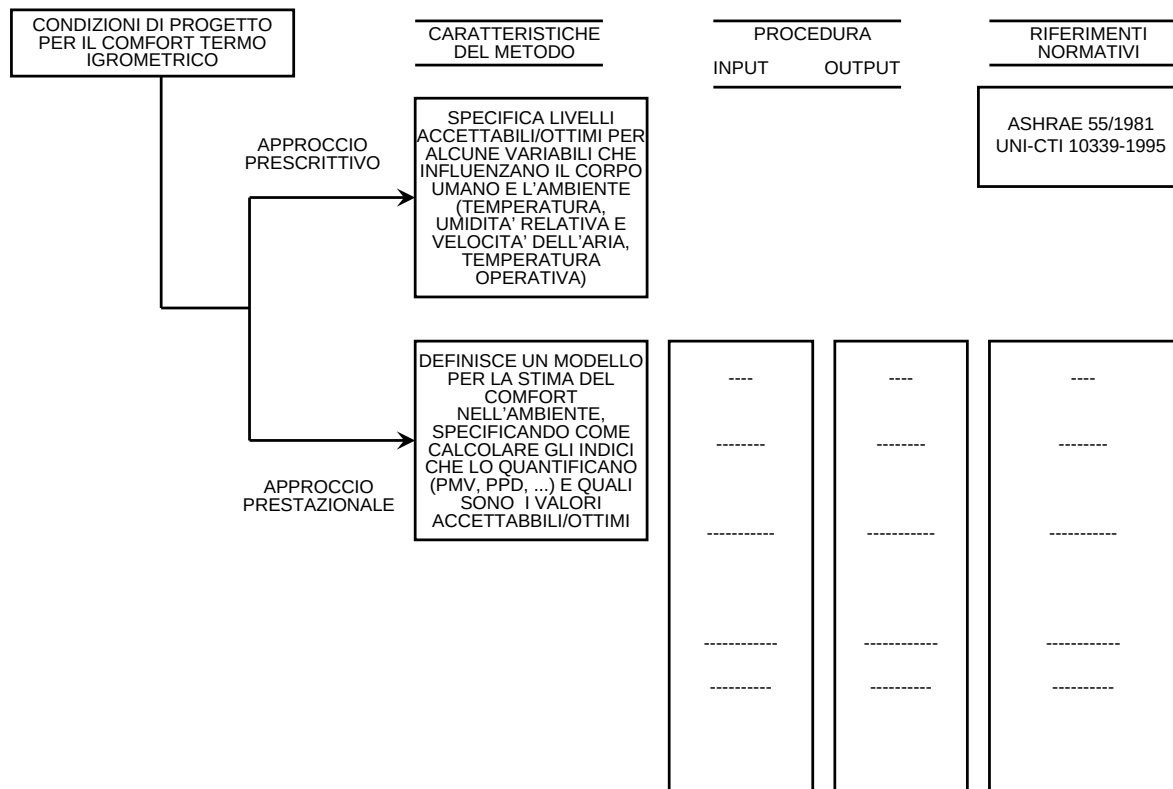


Un esempio



Comfort data logger con trasduttori di comfort:

- Gestisce 6 Trasduttori di Comfort.
- Il "manichino" è conformato come un corpo umano.
- La suddivisione in parti di corpo consente di evidenziare l'influenza dei moti d'aria e della radiazione.





- **temperatura dell'aria**, calcolata tenendo conto dei termini legati agli scambi termici convettivi, quelli connessi con le portate d'aria di infiltrazione e di ventilazione e quelli relativi agli apporti interni (persone, illuminazione, ecc.).
- **temperature delle superfici interne delimitanti il locale**, che debbono essere calcolate tenendo in conto gli scambi per irraggiamento, per convezione e per conduzione nonché gli scambi termici con l'ambiente esterno e/o con locali attigui.



- **temperatura media radiante**, che viene calcolata a partire dalle temperature delle superfici interne (precedentemente calcolate) e tenendo conto dei fattori di vista geometrici relativi alla posizione della persona. Le posizioni cui riferirsi per le diverse tipologie edilizie ed i valori medi dei fattori di vista sono riportati nella Norma ASHRAE 55/92.



- **umidità dell'aria** (la pressione parziale del vapore, l'umidità relativa o l'umidità specifica) può essere calcolata dalla appropriata equazione di bilancio di massa tenendo conto delle portate d'aria di infiltrazione e di ventilazione nonché delle sorgenti interne (persone, processi, ecc.).



- La **velocità dell'aria** non viene normalmente calcolata ma piuttosto si assume che essa sia **non superiore a 0.1 m/s**. Pertanto anche il rischio di insoddisfazione per la presenza di **correnti d'aria** non viene normalmente quantificato. Solo accorgimenti tecnici destinati a limitare i moti locali e/o le fluttuazioni di velocità (tipologia, dimensionamento e collocazione dei diffusori e delle griglie; sistemi per controllare i moti convettivi in corrispondenza delle superfici vetrate e di altre superfici fredde/calde; ecc.)



- Il **livello di attività** e la **resistenza termica dell'abbigliamento** vengono individuati tenendo conto della tipologia edilizia, delle attività che prevedibilmente verranno svolte e del periodo dell'anno (condizioni invernali, estive, ecc.). Valori tipici per questi parametri sono riportati nella norma ISO 7730.



- I valori del **Voto medio previsto PMV** e della **Percentuale prevista di insoddisfatti PPD** vengono calcolati a partire dai valori delle grandezze che li determinano secondo una delle procedure illustrate in precedenza.
- **L'asimmetria della temperatura radiante** viene calcolata con procedura e strumenti analoghi a quelli descritti per il calcolo della temperatura media radiante.



- La **temperatura del pavimento** viene calcolata come le altre temperature delle superfici interne
- La **differenza (gradiente) verticale di temperatura** non viene normalmente calcolata in fase di progettazione. Particolare attenzione deve essere posta alla individuazione degli accorgimenti tecnici che consentono di limitare il rischio che si determinino elevati gradienti verticali di temperatura.



- **ASHRAE** - Mantenere condizioni ambiente che cadano all'interno della zona di comfort del diagramma psicrometrico ASHRAE.
- **UNI 10339** - Mantenere le seguenti condizioni:

	Temperatura aria [°C]	Umidità relativa [%]
Condizioni Invernali	≤ 20	35 ÷ 45
Condizioni Estive	≥ 26	50 ÷ 60



- I valori prescritti dalla Norma UNI-CTI, applicati ad occupazioni sedentarie svolte da persone con abbigliamento tipico invernale ed estivo, portano ad accettare una percentuale di insoddisfatti compresa nel campo 8% - 10%.
- La citata Norma UNI esonera il progettista dal rispetto dei suddetti valori, quando si verifica una, o più di una, delle seguenti situazioni:



- le persone permangono nel locale per brevi periodi (meno di 15 minuti);
- le persone svolgono attività o indossano abbigliamento diversi da quelli considerati tipici per il caso invernale e per il caso estivo;
- esiste una forte differenza ($> 4^{\circ}\text{C}$) tra valori di temperatura dell'aria e temperatura media radiante, oppure si hanno rilevanti asimmetrie radianti;



- la destinazione d'uso dei locali rientra tra quelle di seguito elencate:
 - Ospedali, luoghi di degenza o di cura;
 - Scuole materne ed elementari;
 - Luoghi di ricovero e/o di ritrovo per persone anziane,
 - Palestre;
 - Edifici pregevoli per arte e storia; edifici destinati a contenere biblioteche, archivi, musei, gallerie, collezioni o comunque oggetti di interesse culturale, richiedenti condizioni microclimatiche particolari e che non possano essere confinati in teche;
 - Centri elaborazione dati e centri meccanografici.



- Nel progetto dei *Climate sensitive building*, dove la climatizzazione è tendenzialmente naturale, salvo eventualmente periodi limitati dell'anno, un aspetto importante riguarda la definizione degli obiettivi di benessere da porre alla base del progetto.
- Tali obiettivi non possono essere quelli adottati per gli edifici climatizzati artificialmente dalla UNI EN ISO standard 7730 e dall'ASHRAE standard 55.
- Tali standard largamente utilizzati in ambito internazionale, definiscono gli obiettivi di benessere indipendentemente dal contesto climatico e dalla tipologia degli edifici.
- Essi sono stati messi a punto come strumenti di riferimento per il progetto di edifici climatizzati artificialmente durante tutto il corso dell'anno.



In tali edifici l'*aspettativa* dei soggetti è quella di un ambiente definito igro-termicamente in termini pressoché statici, senza possibilità di regolazione. Una minima variazione rispetto alle condizioni igrometriche standard è risentita negativamente

Tale tipo di *aspettativa* dipende da una sorta di condizionamento cultural psicologico che porta ad accettare situazioni non naturali, indotto dall'essere in ambienti artificiali.



Gli standard visti sono stati sviluppati, in camere di prova condizionate, attraverso una logica deterministica centrata su bilanci energetici, sulla reattività fisiologica del corpo umano (variazione della temperatura della pelle attivata da vasocostrizione o vasodilatazione e perspirazione, igroscambio da traspirazione, perspirazione, respirazione), alle condizioni igrotermiche ambientali (T_a , T_s , UR , va), e sul concetto di neutralità sensoria derivante da un corretto bilancio tra input e output calorici orientato a mantenere costante la temperatura corporea interna e in particolare cerebrale.



Climate sensitive building: L'approccio adattivo

Un ambiente naturale al contrario di quello artificiale è caratterizzato da condizioni variabili.

Mentre in ambiente climatizzato artificialmente una minima variazione viene risentita negativamente, in ambiente esterno naturale vengono sopportate condizioni molto più variabili.

In ambienti interni, dove il controllo delle condizioni ambientali avviene attraverso una osmosi controllata tra ambiente esterno ed interno, centrata sulla ventilazione naturale per un lungo periodo dell'anno (primaverile ed estivo), si manifesta una "adattività" comportamentale indotta da reazioni cosce ed inconscie, legate ad esempio a cambiamenti di abbigliamento, modifica del livello di attività, azioni dirette a controllare il clima interno (chiusura e apertura delle finestre, azionamento di schermature, regolabilità di dispositivi da parte dell'utente, ecc.).



Climate sensitive building: L'approccio adattivo

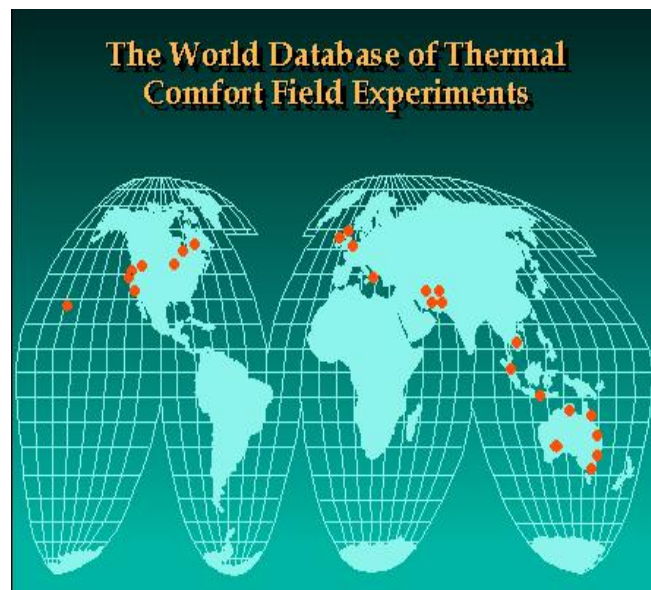
In ambienti non condizionati l' *aspettativa* è molto meno esigente. Il soggetto in questo caso non si attende una condizione fisiologicamente neutrale come quella ricavabile in laboratorio dalle risposte di campioni di soggetti immessi in camere di prova dove gli unici parametri variabili sono quelli igrotermico.

Infatti la realtà sensoriale nel mondo reale si confronta con una variegata numerosità di agenti di stimolazione che se da un lato ne rendono complessa l'interpretazione, dall'altro portano a rendere accettabili situazioni non in linea con gli esiti ottenuti in camera sperimentale condizionata.

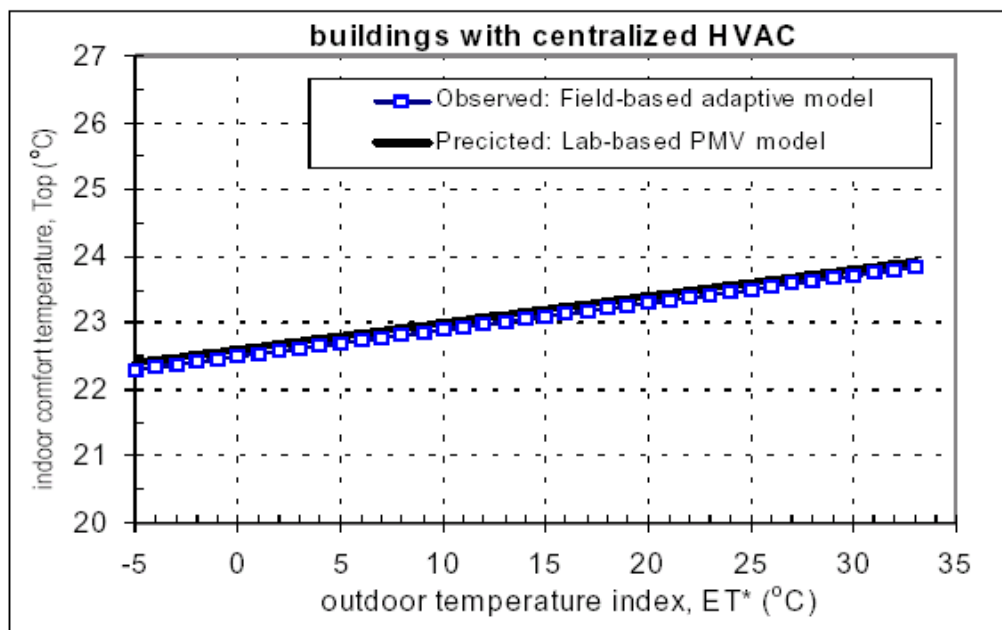
La reattività umana al contesto non è solo infatti fisiologica, ma molto più complessa e basata su modificazioni dei comportamenti e graduale adattamento delle proprie aspettative. La possibilità di controllare le condizioni ambientali costituisce un fattore che agisce sulla psicologia dei soggetti e che potenzia la sua adattabilità



ASHRAE ha condotto una ricerca basata sul concetto dell'*adaptive approach* che parte dalla considerazione della particolare reattività dei soggetti in ambiente naturale. Tale ricerca è orientata a definire un nuovo standard per gli edifici climatizzati naturalmente



Modello di comfort tradizionale a confronto con il modello adattivo



TEMPERATURA DI COMFORT per edifici con sistemi di climatizzazione centralizzati, sulla base del modello di comfort adattivo e derivati dal modello di laboratorio basato su PMV



Temperatura Esterna Effettiva ET^*
(Outdoor effective temperature ET^*);

Nell'approccio del comfort adattivo, la temperatura di comfort ottimale dipende dalla temperatura esterna ET^* .

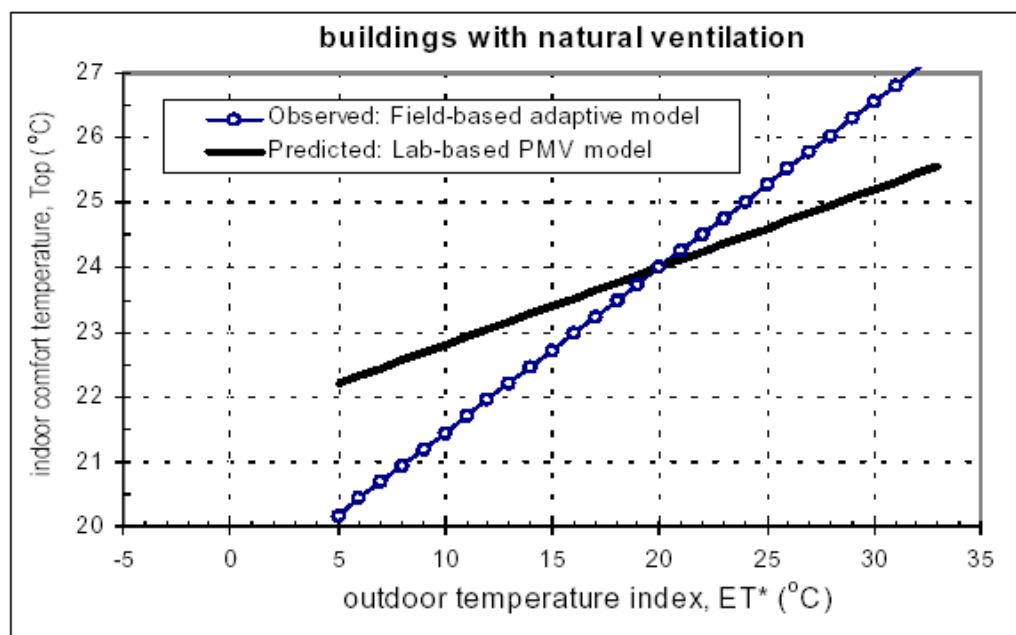
La ET^* è definita come la temperatura a bulbo secco (T_{BS}) con umidità relativa costante al 50%, la quale permette uno scambio radiativo, convettivo ed evaporativo simile nell'ambiente in analisi.

In teoria, la radiazione può essere tenuta in considerazione utilizzando la temperatura operativa invece di T_{BS} .

In assenza di radiazione, le linee di ET^* coincidono con la T_{BS} corrispondente all'umidità relativa del 50%.



Modello di comfort tradizionale a confronto con il modello adattivo



TEMPERATURA DI COMFORT per edifici con ventilazione naturale, sulla base del modello di comfort adattivo e derivati dal modello di laboratorio basato su PMV

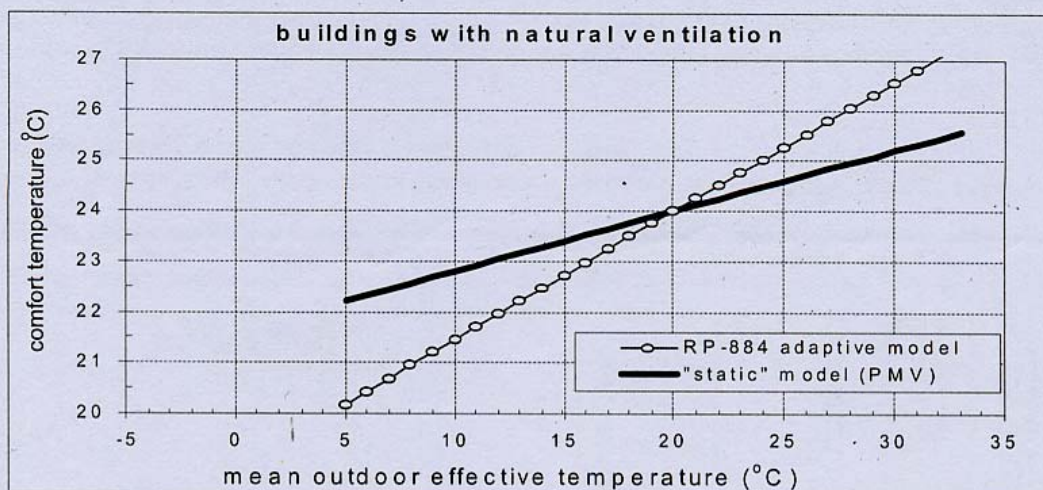


Figure 7: Adaptive vs. Static comfort model predictions. Comparison of the RP-884 adaptive models' predicted indoor comfort temperatures with those predicted by the "static" PMV model. The static model's comfort temperature for each building was derived by inputting the building's mean v , rh , clo , met into the PMV model and then iterating for different t_o until $PMV=0$.

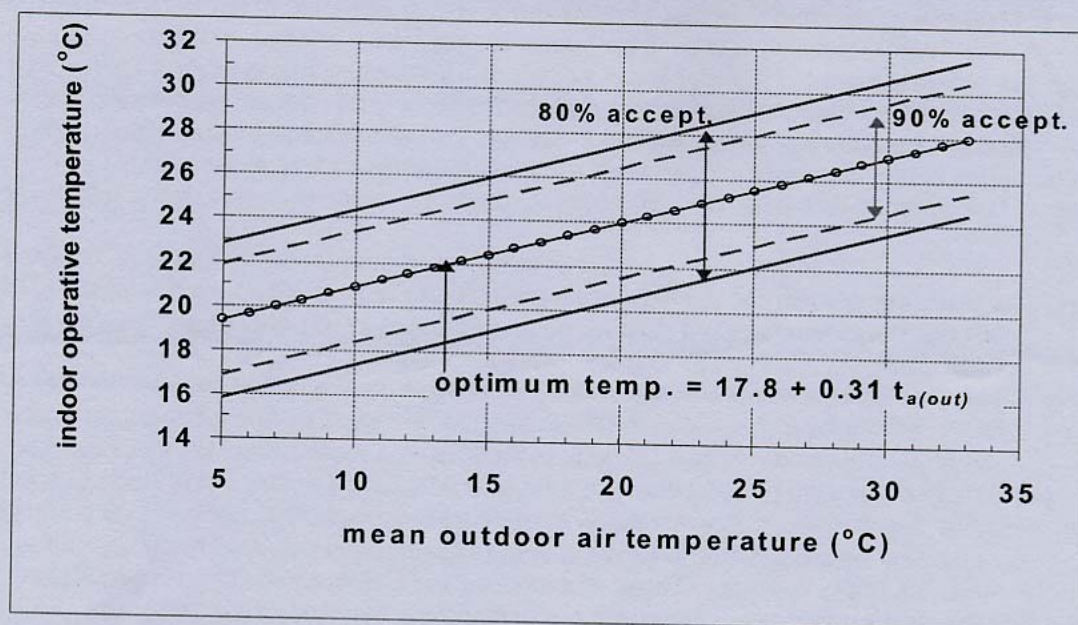
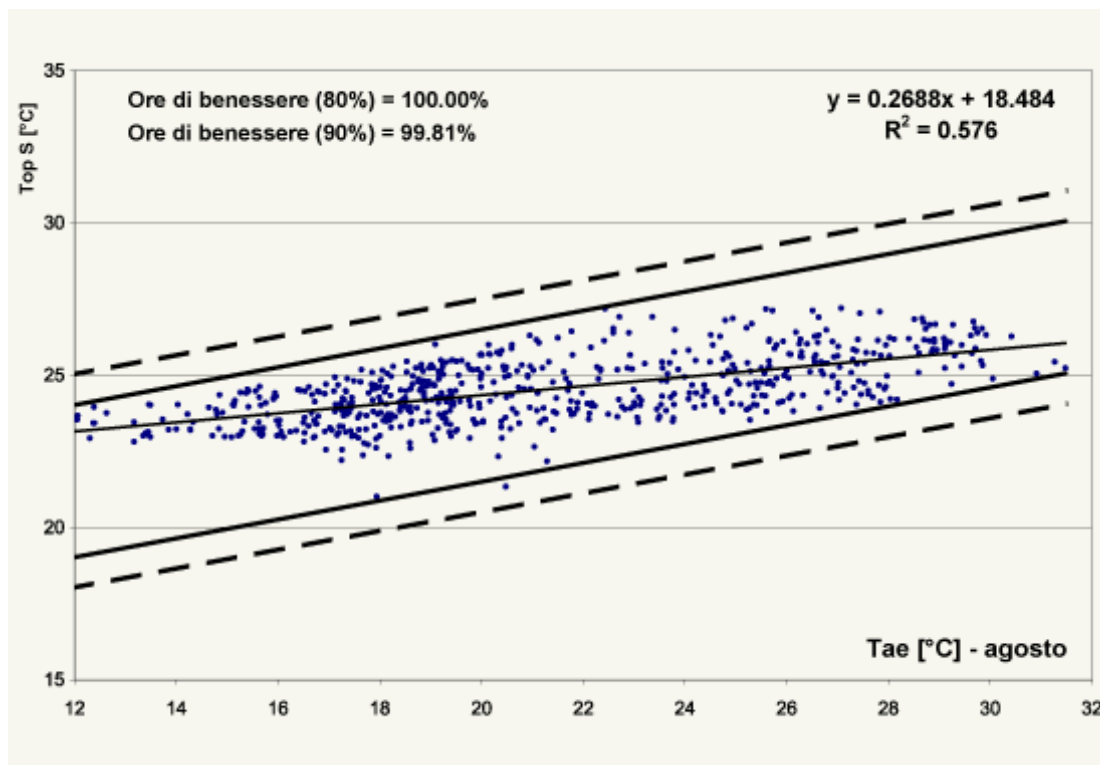


Figure 6: Optimum temperatures in naturally ventilated spaces as a function of prevailing outdoor temperature. $t_{a(out)}$ is simply an arithmetic average of the mean monthly minimum and maximum daily air temperatures for the month in question.



Il nuovo standard per gli edifici ventilati naturalmente



Le condizioni “edilizie” per il benessere termoigrometrico

Occorre progettare il **sistema edilizio** (*involucro + solai + tramezzi*) in modo da:

- *minimizzare i costi energetici per mantenere la temperatura OPERATIVA ai valori di benessere;*
- *minimizzare i costi impiantistici per la climatizzazione riducendo i flussi termici scambiati attraverso l'involucro*

cioè occorre evitare che entrambi:

- la temperatura dell'aria
- la temperatura media radiante

risultino essere delle funzioni fortemente dipendenti dalle variabili climatiche e dai carichi termici interni all'edificio

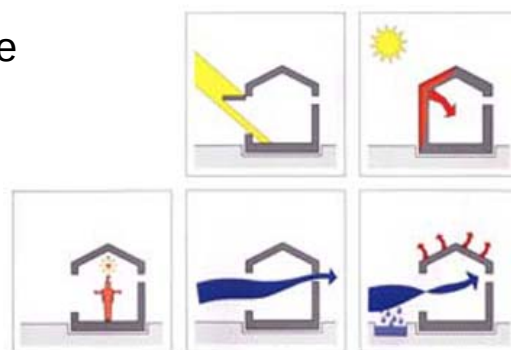




Figure e disegni sono stati presi principalmente da:

➤ [http://www.innova.dk /](http://www.innova.dk/)