

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI



FACOLTÁ DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA



Laurea in Architettura

DICAAR

IMPIANTI PER LA SOSTENIBILITA' ENERGETICA DEGLI EDIFICI

A.A. 2019-2020

Le condizioni ambientali di comfort

Docente: ROBERTO RICCIU

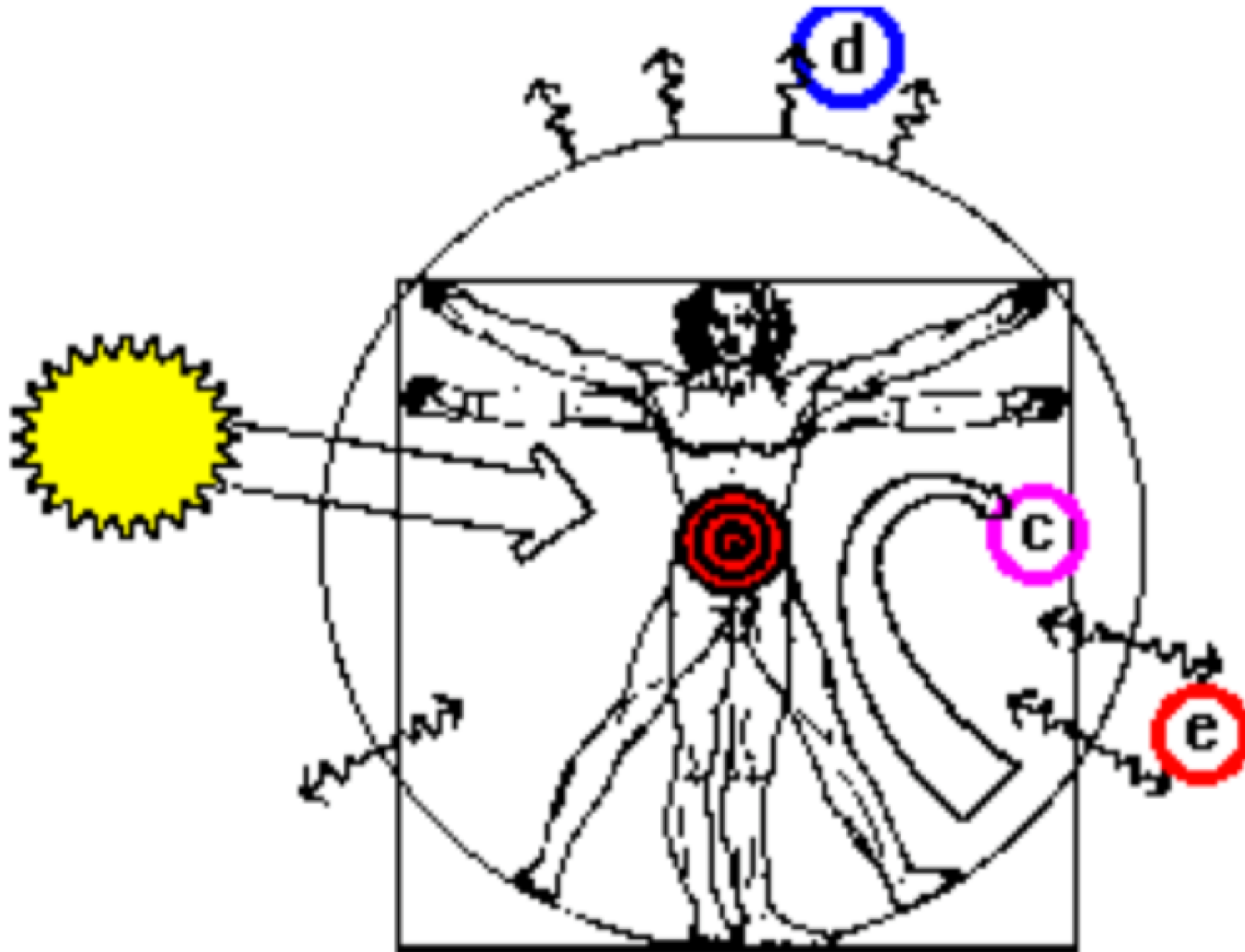
Roberto Ricciu: Corso di impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici

Le condizioni ambientali di comfort

- **Riferimenti normativi:**
 - **UNI EN ISO 7730;**
 - **ASHRAE 55**
 - **IMPIANTI TERMOTECNICI** VOLUME PRIMO
- PROF. ING. GIULIANO CAMMARATA www.gcammarata.net

Le condizioni ambientali di comfort

- **BILANCIO ENERGETICO FRA UOMO ED AMBIENTE.**



Roberto Ricciu: Corso di impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici

BILANCIO ENERGETICO FRA UOMO ED AMBIENTE

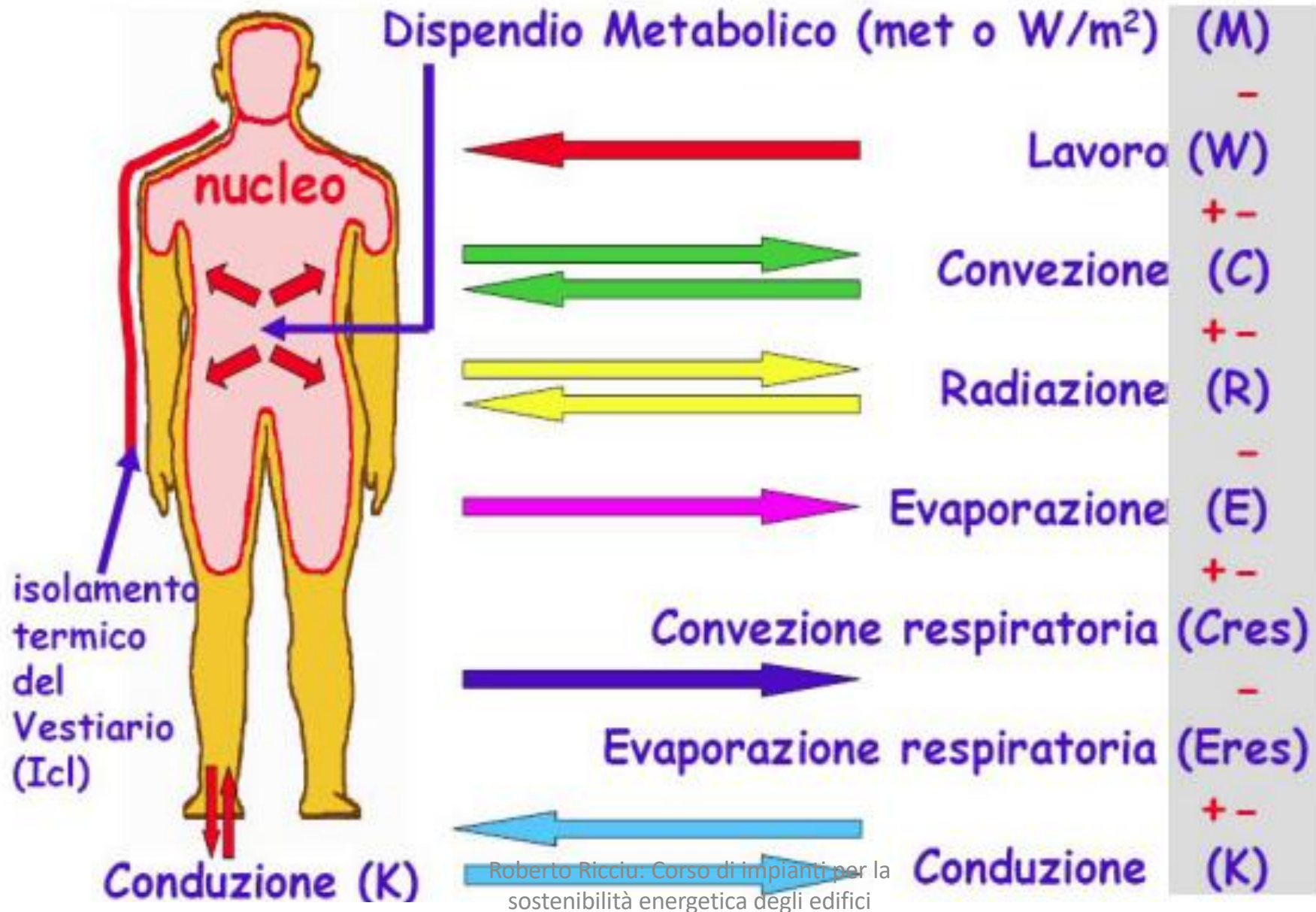
- Condizioni stazionarie

- $M - (+/- L +/- E +/- R +/- C) = 0$

- M = potenza sviluppata per attività metabolica (W);
- L = potenza dissipata per attività lavorativa (positivo se compiuto dal corpo sul l'ambiente esterno) (W);
- E = potenza termica per evaporazione (W);
- R = potenza termica scambiata per radiazione,(W);
- C = potenza termica scambiata per convezione,(W).

Le condizioni ambientali di comfort

Equazione di Bilancio Termico = S/Wm^2



Le condizioni ambientali di comfort

• EQUAZIONE DEL COMFORT DI FANGER

$$M(1-\eta) - 0.3A_D(2.56t_{sk} - 33.7 - p_{cl}) - E_{sk} - 1.7 \cdot 10^{-3}M(58.5 - p_{cl}) - 1.6 \cdot 10^{-3}M(34 - t_a) =$$
$$= A_D \frac{t_{sk} - t_{cl}}{0.155I_{cl}} = 3.96 \cdot 10^{-8} A_D F_{cl} \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4 \right] + h_c A_D F_{cl} (t_{cl} - t_a)$$

t_{sk} - temperatura media della pelle, °C;

t_{cl} - temperatura media degli indumenti, °C;

t_a - temperatura ambiente, °C;

A_D - superficie del corpo umano secondo *Du Bois*, espressa in m^2 , data dall'espressione:

$$A_D = 0.203 \cdot P^{0.425} H^{0.725}$$

P = massa del corpo, kg

H = altezza del corpo, m

V = velocità dell'aria, m/s ;

E_{sk} = potenza termica per traspirazione, W

h_c = coefficiente di convezione fra gli indumenti e l'ambiente esterno, $W/(m^2K)$;

F_{cl} = rapporto fra superficie coperta e nuda del corpo;

I_{cl} = resistenza termica del vestiario, $1 Clo = 0,155 (m^2K/W)$;

P_a = tensione parziale del vapore nell'aria ambiente, $mbar$.

Le condizioni ambientali di comfort

AMBIENTI MODERATI

Gli ambienti moderati sono quelli che richiedono un moderato intervento del sistema di termoregolazione umano. Sono caratterizzati da:

- condizioni ambientali omogenee con ridotta variabilità nel tempo,
- assenza di grandi scambi termici localizzati fra soggetto e ambiente,
- attività fisica modesta,
- sostanziale uniformità del vestiario indossato dai diversi operatori.



Le condizioni ambientali di comfort

PARAMETRI OGGETTIVI
(dipendono dall'ambiente)



PARAMETRI SOGGETTIVI
(dipendono dall'uomo)



Roberto Ricci: Corso di impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici

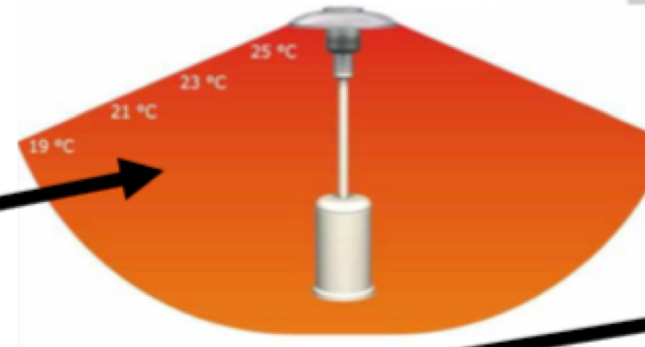
Le condizioni ambientali di comfort

PARAMETRI OGGETTIVI
(dipendono dall'ambiente)

1. Temperatura a bulbo secco dell'aria (T_{ba} , [°C])



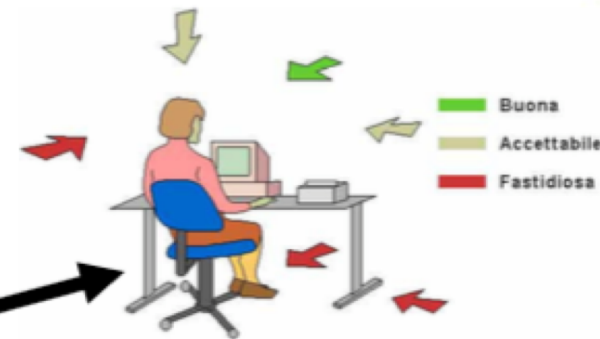
2. Temperatura media radiante (T_r , [°C])



3. Umidità relativa dell'aria (U.R, [%])



4. Velocità media relativa dell'aria (w , [m/s])



Le condizioni ambientali di comfort

PARAMETRI SOGGETTIVI
(dipendono dall'uomo)

5. Resistenza termica
dell'abbigliamento (R_{dress} , [Clo o $\text{m}^2\text{K/W}$])



6. Metabolismo energetico (M, [W])



Le condizioni ambientali di comfort

La TEMPERATURA A BULBO SECCO (in inglese *dry bulb temperature*) è quella temperatura misurata da un comune termometro a bulbo. La misura di tale temperatura è assolutamente indipendente dall'umidità relativa dell'aria.

La TEMPERATURA DI BULBO UMIDO (in inglese *wet bulb temperature*) è la temperatura cui si porta l'acqua in condizioni di equilibrio di scambio convettivo con una massa d'aria in moto turbolento completamente sviluppato.

Le due temperature possono essere misurate con lo PSICROMETRO, strumento costituito da due termometri affiancati, di cui uno è chiamato bulbo secco e misura la T_{ba} dell'aria, mentre l'altro, avvolto in una garza di cotone imbevuta d'acqua, è chiamato bulbo umido e misura la T_{bb} con l'aria (ovvero la temperatura di bulbo umido).

umidità relativa = 100%
 T_{ba} e T_{bb} coincidono



Le condizioni ambientali di comfort

La **TEMPERATURA MEDIA RADIANTE** può essere definita come la temperatura di un ambiente fittizio, termicamente uniforme, che scambierebbe con l'uomo la stessa potenza termica radiante scambiata nell'ambiente reale. Tale grandezza si misura in °C.

La $T_{\text{media-radiante}}$ può essere misurata attraverso il **GLOBOTERMOMETRO**. Tale strumento, spesso chiamato globo nero, è costituito da una sonda di temperatura sistemata all'interno di una sfera di rame, a pareti sottili, verniciata in nero opaco. **La sfera cava costituisce, con buona approssimazione, un corpo nero quasi perfetto e riceverà, trascorso il tempo necessario, tutta l'energia termica radiante proveniente dall'ambiente circostante.**

Il livello termico misurato dalla sonda interna è stima della temperatura media radiante delle superficie dell'ambiente.



Le condizioni ambientali di comfort

Si definisce **UMIDITA' RELATIVA** (o **UR**, oppure ancora **Φ**) il rapporto tra la quantità di vapore acqueo contenuto in una massa d'aria e la quantità massima di vapore acqueo che la stessa massa d'aria riesce a contenere, nelle stesse condizioni di temperatura e pressione, ancora in fase aeriforme ma in condizioni di saturazione.

L'umidità relativa, cui sinonimo è **GRADO IGROMETRICO**, si misura in percentuale. Quando l'umidità relativa è al 100%, ciò significa che il contenuto di umidità nell'aria è il massimo compatibile con quello stato termodinamico.

La quantità di vapore che può essere contenuta da una massa d'aria diminuisce al diminuire della temperatura (diventa nulla a circa $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Diverse tecniche e principi fisici consentono le misure dei parametri igrometrici, differenziandosi rispetto al parametro misurato (umidità specifica, temperatura di rugiada, temperatura di bulbo umido).

Esistono, pertanto, sensori igroscopici, a condensazione, elettromagnetici, psicrometrici.

Roberto Ricciu: Corso di impianti per la sostenibilità energetica degli edifici



Le condizioni ambientali di comfort

Alla **VELOCITA' DELL'ARIA** è imputata la **sensazione di movimento** che produce “effetti termici”, anche senza variazione della temperatura. Il **crescere della velocità dell'aria favorisce la cessione di energia attraverso la superficie dell'epidermide, nei seguenti modi:**

1. Aumento della dissipazione per **convezione**, fino a quando la temperatura dell'aria rimane inferiore a quella dell'epidermide.

2. Accelerazione dell'**evaporazione** e quindi **raffrescamento fisiologico**.

- a basse umidità relative (< 30%) questo effetto è irrilevante in quanto si ha già una intensa evaporazione anche con aria ferma;
- alle alte umidità (> 80%) l'evaporazione è comunque limitata e il movimento dell'aria non ha grandi effetti rinfrescanti.
- l'evaporazione può essere invece notevolmente accelerata alle medie umidità (40-50%): se l'aria è ferma, lo strato più vicino all'epidermide si satura velocemente, impedendo un'ulteriore evaporazione, il movimento dell'aria invece può assicurare un ricambio e quindi una continua evaporazione.

		Classe C (benessere)	
Grandezza	Simbolo	Campo di misura	Precisione
Temperatura dell'aria	t_a	10°C ÷ 30°C	Richiesta: ± 0,5 °C Desiderabile: ± 0,2 °C Per $ t_r - t_a = 10^\circ\text{C}$
Temperatura media radiante	t_r	10°C ÷ 40°C	Richiesta: ± 2 °C Desiderabile: ± 0,2 °C Quando non possono essere raggiunti indicare il valore effettivo della precisione
Asimmetria della temperatura radiante	Δt_{pr}	0 K ÷ 20 K	Richiesta: ± 1 K Desiderabile: ± 0,5 K
Velocità dell'aria	v_a	0,05 m/s ÷ 1 m/s	Richiesta: ± $ 0,05 + 0,05 v_a $ m/s Desiderabile: ± $ 0,02 + 0,07 v_a $ m/s Per direzione del flusso interna ad un angolo solido pari a 3π sr
Umidità assoluta espressa come pressione parziale del vapore d'acqua	p_a	0,5 kPa ÷ 2,5 kPa	± 0,15 kPa Anche per temperature dell'aria e delle pareti uguali o maggiori di 30°C per una differenza $ t_r - t_a $ di almeno 10°C
Temperatura di bulbo umido a ventilazione naturale	t_{nw}	Uso non raccomandato	
Temperatura di globo	t_g	Uso non raccomandato	
Temperatura di globo umido	t_{wg}	Uso non raccomandato	

UNI EN ISO 7726

Le condizioni ambientali di comfort

Il **metabolismo** è il complesso di processi chimici e fisici che ha luogo nel corpo umano (trasformazione degli alimenti, trasformazione di ossigeno in CO₂, modifica, crescita e rigenerazione delle cellule dell'organismo, funzioni fisiologiche e attività motorie).

Per metabolismo energetico (M) intendiamo la differenza media, nell'unità di tempo, tra **energia somministrata** (alimenti, bevande e ossigeno) e l'**energia ceduta**.

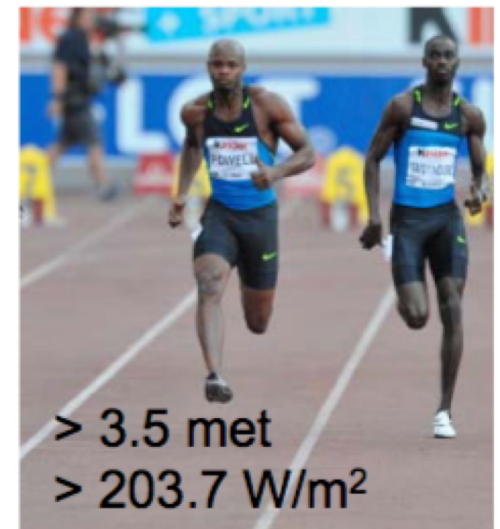
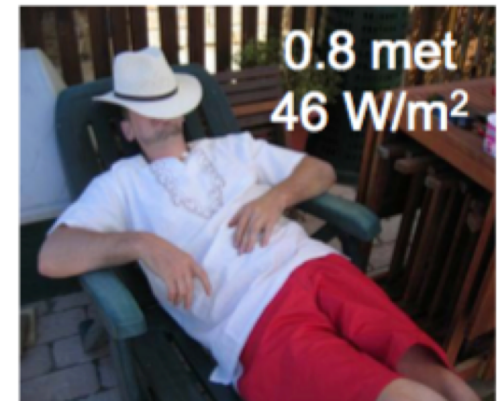
E' distinguibile in 2 aliquote:

- **Metabolismo energetico basale**, necessario per il funzionamento degli organi vitali, ed è quello misurato in soggetto a riposo fisico e mentale, in condizioni di neutralità termica (conta circa 45 W/m²).
- **Metabolismo energetico legato all'attività**, in particolare tendente ad aumentare con l'impegno fisico e mentale.

Per il metabolismo energetico si è soliti usare una unità di misura incoerente, il met.

Convenzionalmente, si è posto 1 met = 58.2 W/m².

La superficie corporea di un uomo è pari a circa 1.8 m².



Le condizioni ambientali di comfort

Infine, l'ultimo parametro che condiziona il comfort è la **RESISTENZA TERMICA** dell'abbigliamento, convenzionalmente misurata attraverso l'unità incoerente definita "clo".

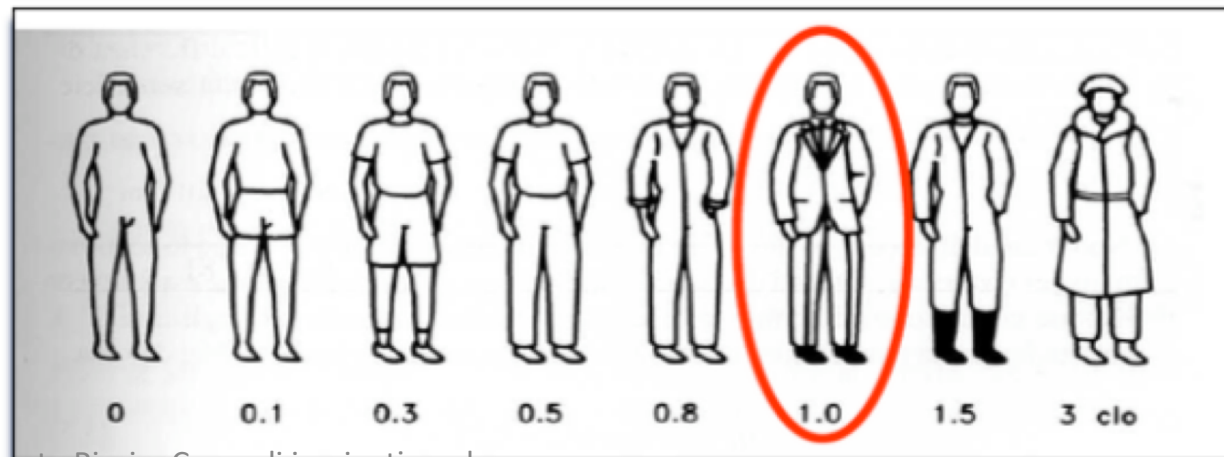
Al pari del metabolismo energetico, anche la resistenza termica è usualmente misurata attraverso idonee tabelle.

La resistenza termica dell'abbigliamento è espressa in $(m^2K)/W$ o come accade più frequentemente, nell'unità incoerente clo.

[1 clo = $0.155 [(m^2 K)/W]$.

1 clo corrisponde alla resistenza media di un abbigliamento invernale; l'abbigliamento estivo offre una resistenza termica pari a circa 0.6 clo.

Attività	Energia metabolica	
	W/m ²	met
Disteso	46	0,8
Seduto, rilassato	58	1,0
Attività sedentaria (ufficio, casa, scuola, laboratorio)	70	1,2
Attività leggera in piedi (compere, laboratorio, industria leggera)	93	1,6
Attività media in piedi (commesso, lavori domestici, lavori a macchina)	116	2,0



Le condizioni ambientali di comfort

COMFORT TERMOIGROMETRICO

Valori di riferimento per ambienti termicamente moderati

REGIME INVERNALE

$$T_{ba} = 19.0 - 24.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

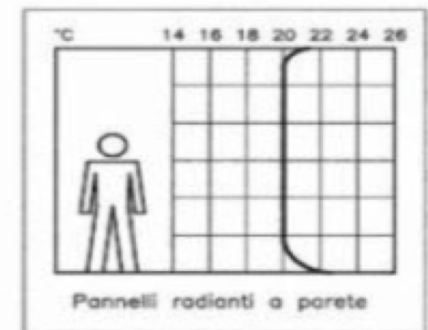
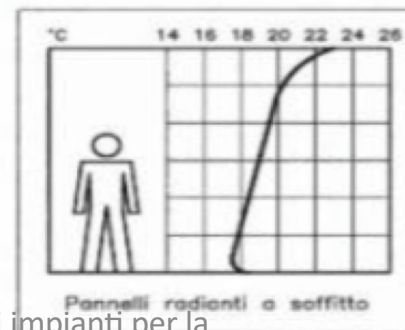
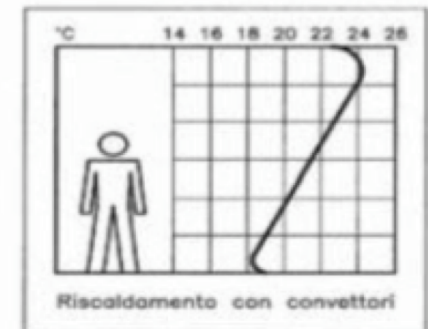
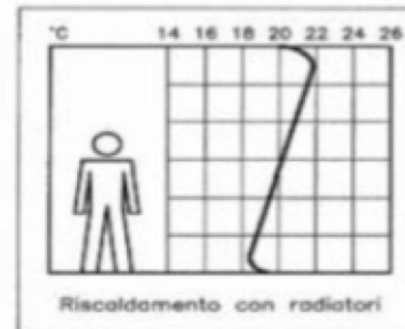
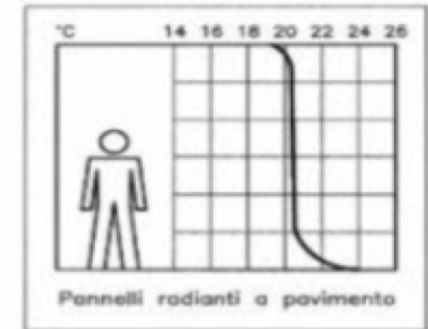
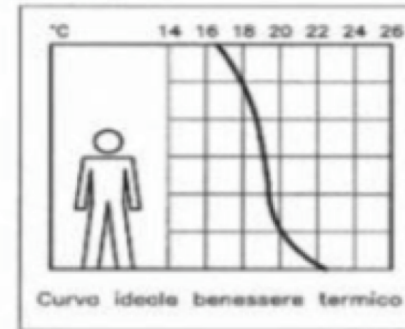
$$\text{U.R.} = 30\% - 60\%$$

$$w = 0.05 - 0.20 \text{ m/s}$$

$$T_{\text{media-radiante}} = 18 - 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Metabolismo Energetico: dipende dalla destinazione d'uso e dalla attività.

Resistenza termica vestiario: idonea al regime invernale in ambienti chiusi ≈ 1 clo.



Le condizioni ambientali di comfort

Valori di riferimento per ambienti termicamente moderati

REGIME ESTIVO

$$T_{ba} = 23 - 26.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

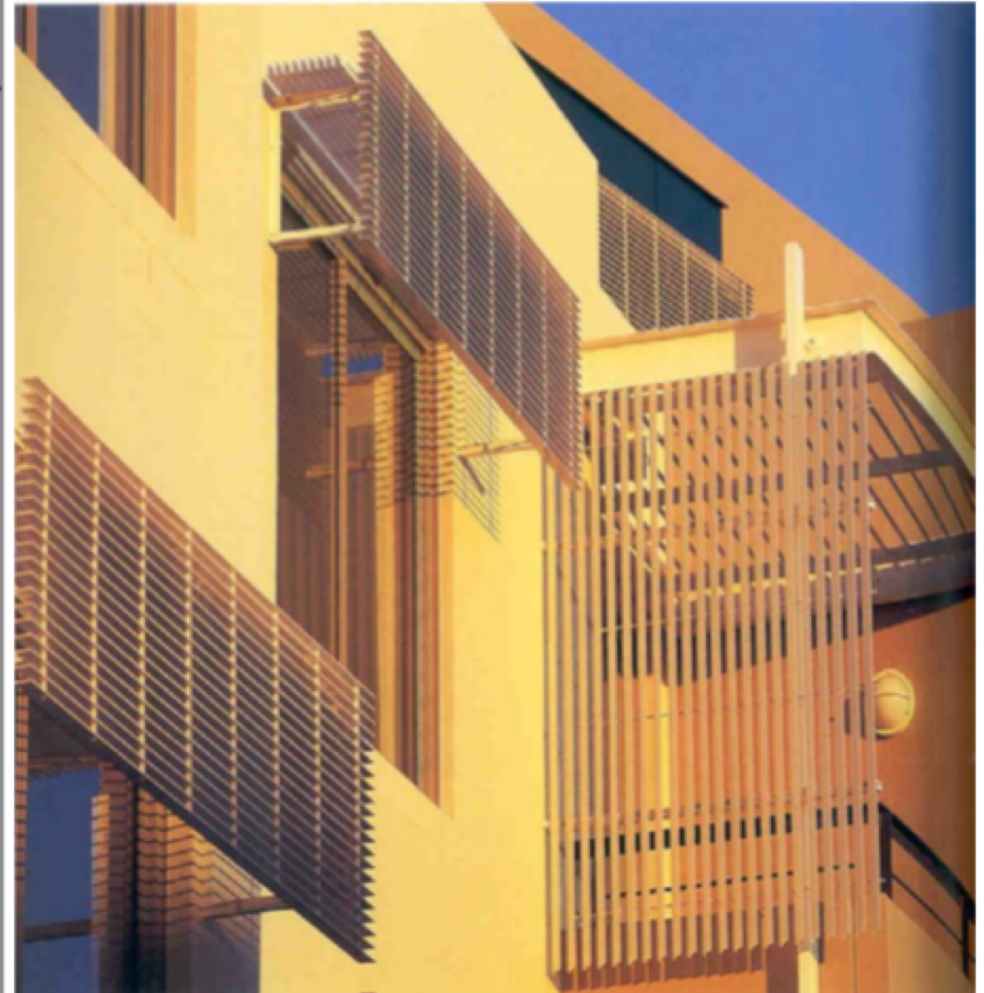
$$\text{U.R.} = 30\% - 60\%$$

$$W = 0.05 - 0.20 \text{ m/s}$$

$$T_{\text{media-radiante}} = 22 - 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Metabolismo Energetico: dipendente dalla destinazione d'uso e dalla attività.

Resistenza termica vestiario: idonea al regime estivo in ambienti chiusi ≈ 0.6 clo.



Le condizioni ambientali di comfort

Alcune considerazioni

Temperatura dell'aria e temperatura media radiante

In precedenza abbiamo visto i 6 parametri da cui dipende il comfort in ambienti chiusi.

Può essere utile accorparli, al fine di ridurli e gestirli in modo più semplice.

Partendo dalle due temperature sopra citate, la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante delle superfici dell'ambiente, si definisce TEMPERATURA OPERANTE (o OPERATIVA):

.la temperatura uniforme di una cavità in cui il soggetto scambierebbe per convezione e irraggiamento la stessa energia che effettivamente scambia nell'ambiente reale non uniforme.

Numericamente, la temperatura operativa la media pesata della temperatura dell'aria e di quella media radiante, in cui le conduttanze unitarie radiative (abiti-superfici) e convettive (abiti-aria) costituiscono i coefficienti di peso.

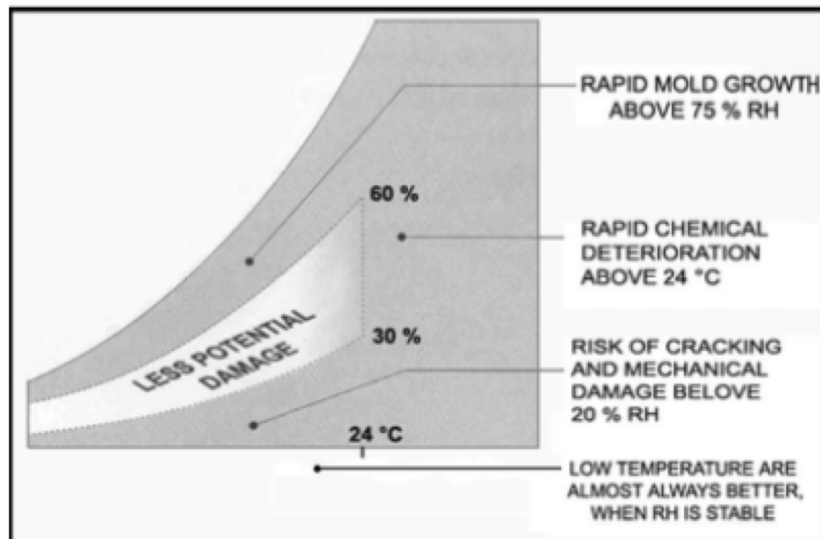
Le condizioni ambientali di comfort

Alcune considerazioni

Umidità relativa

L'uomo tollera ampie oscillazioni di umidità relativa. Solitamente, tra il 30% ed il 60%, in entrambi i regimi invernali ed estivi, non si innesca discomfort.

Molto diverso il discorso per i materiali organici e non, soprattutto quando di natura igroscopica. Ad esempio, se in un ambiente destinato al comfort umano è molto più importante il controllo della temperatura, esattamente l'opposto avviene in ambienti museali, dove il controllo del grado igrometrico è sovra-ordinato al controllo del livello termico, al fine di evitare degradazione delle opere d'arte.



Le condizioni ambientali di comfort

Alcune considerazioni

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 0.30 m/s) può essere fastidiosa.

Velocità dell'aria:

- *Fino a 0.25 m/s: impercettibile;*
- *0.25-0.50 m/s: piacevole (solo 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.

Le condizioni ambientali di comfort

- EQUAZIONI DEL COMFORT DI FANGER (7730:06)

1

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5\,733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5\,867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ -3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\}$$

2

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\}$$

3

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

4

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases}$$

M is the metabolic rate [W/m²]; **W** is the effective mechanical power [W/m²];

I_{cl} is the clothing insulation [m²K/W];
f_{cl} is the clothing surface area factor [-];

t_a is the air temperature [° C];

t_r is the mean radiant temperature [° C];

v_{ar} is the relative air velocity [m/s];

p_a is the water vapor partial pressure [Pa];

h_c is the convective heat transfer coefficient [W/m²K];

t_{cl} is the clothing surface temperature [° C].

Le condizioni ambientali di comfort

L'indice PMV (Predicted Mean Vote, Voto Medio Previsto)

Scala di sensazione termica a sette punti

3	Molto caldo
2	Caldo
1	Abbastanza caldo
0	Né caldo né freddo
-1	Abbastanza freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Le condizioni ambientali di comfort

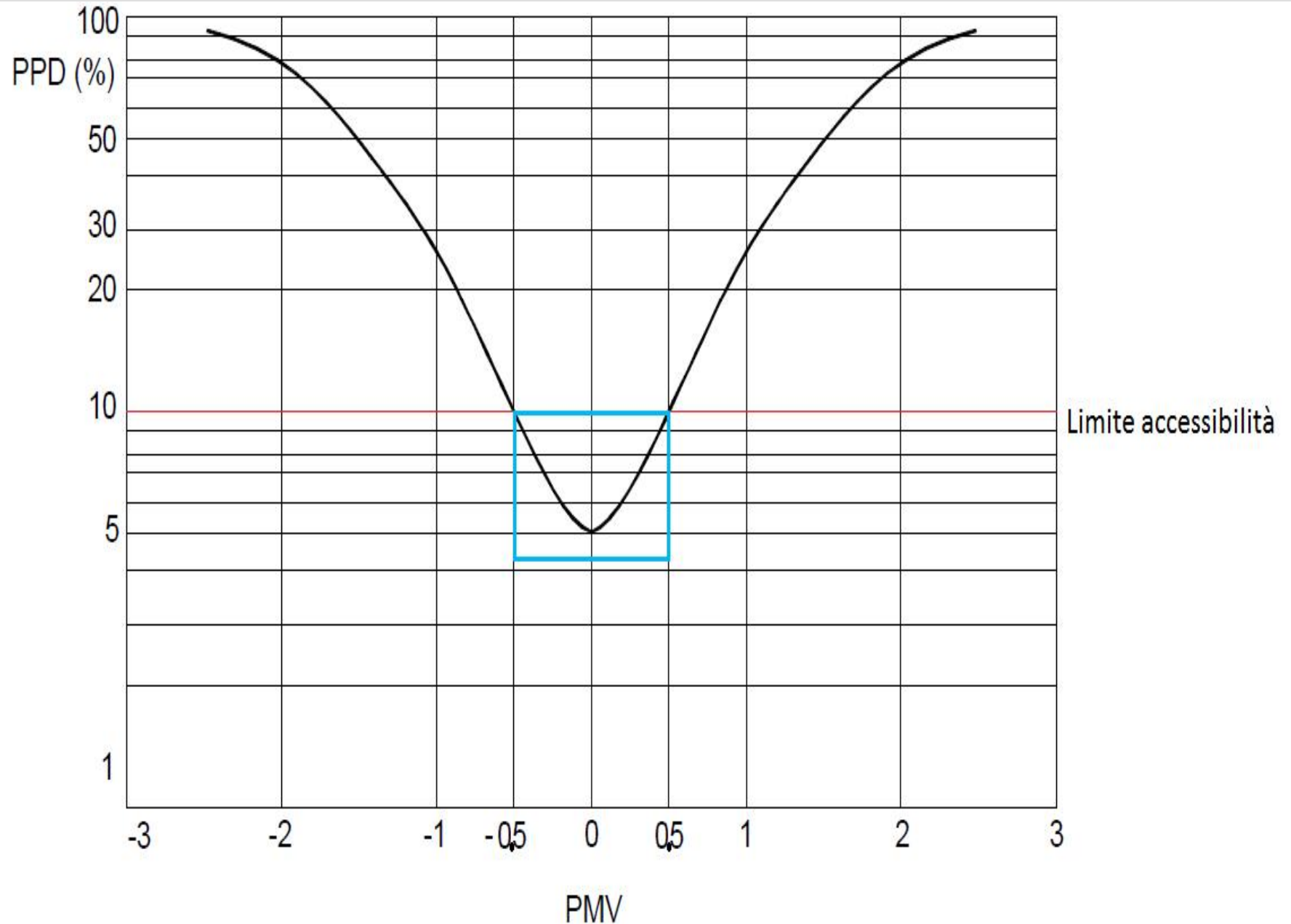
Fanger ha definito un altro indice,

il PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)

che rappresenta la percentuale prevista di insoddisfatti, dove gli insoddisfatti sono rappresentati da coloro che votano ± 2 o ± 3 , utilizzando i dati raccolti sui 1300 soggetti dei quali si è detto precedentemente, ha poi correlato il PMV al PPD con l'equazione:

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0,03353 PMV^4 - 0,2179 PMV^2)$$

Le condizioni ambientali di comfort



NB: PMV=0 → PPD=0 (=5%).

Il discomfort locale

Sino ad ora, si è parlato del benessere termico ed igrometrico dell'individuo rispetto all'ambiente nel suo complesso.

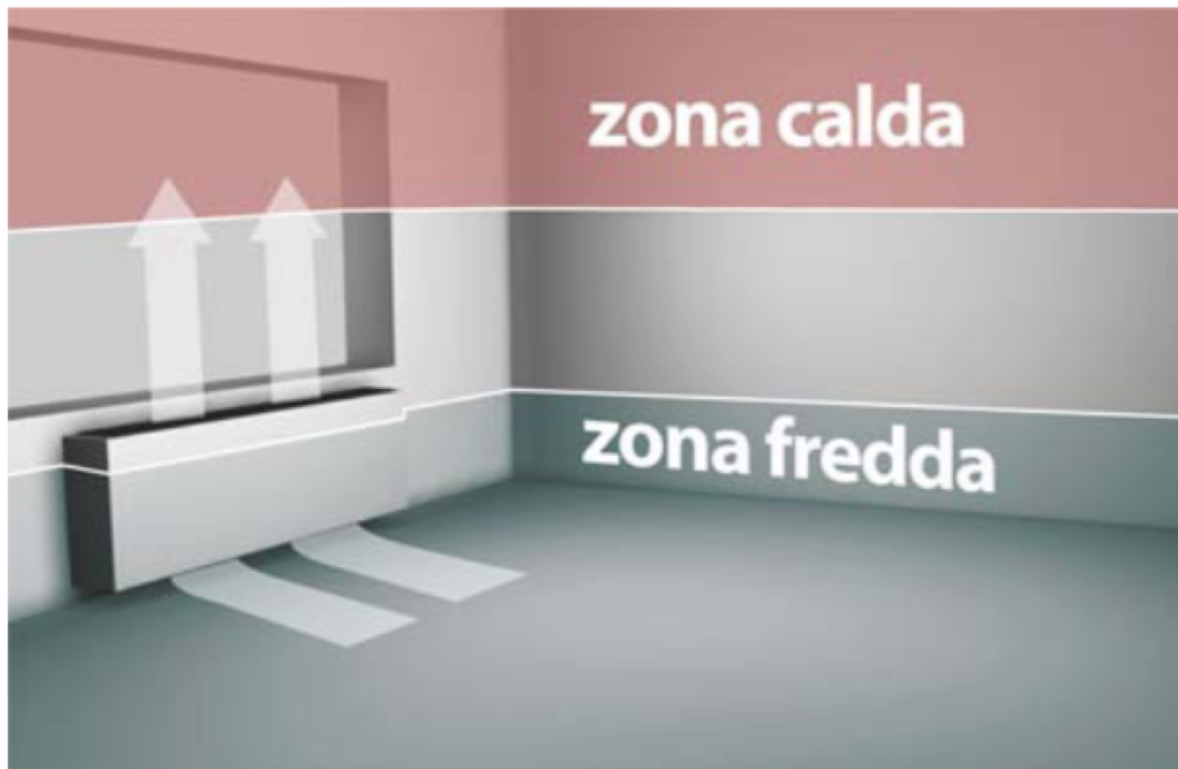
In realtà, esistono anche “cause locali di discomfort”, di seguito brevemente illustrate.

1. Elevata differenza verticale di temperatura dell'aria.
2. Pavimento troppo caldo o troppo freddo.
3. Correnti d'aria.
4. Elevata asimmetria della temperatura piana radiante.

Le condizioni ambientali di comfort

1. Elevata differenza verticale di temperatura dell'aria.

In ambiente possono verificarsi dei gradienti verticali di temperatura, poiché, per ragioni connesse alla densità minore, l'aria più calda tende a stratificare verso l'alto. Tale evento, oltre ad implicare un maggior consumo di energia nel periodo di riscaldamento, può produrre sensazione di discomfort (caldo alla testa, freddo ai piedi).



La norma UNI EN ISO 7730/1997, nella precedente versione che non considerava il comfort adattativo, prevedeva che tale differenza di temperatura ΔT , a 0.1 m e 1.1 m (soggetto seduto), non fosse superiore ai 3°C.

Ciò equivale ad accettare una percentuale massima di insoddisfatti pari al 5%.

Le condizioni ambientali di comfort

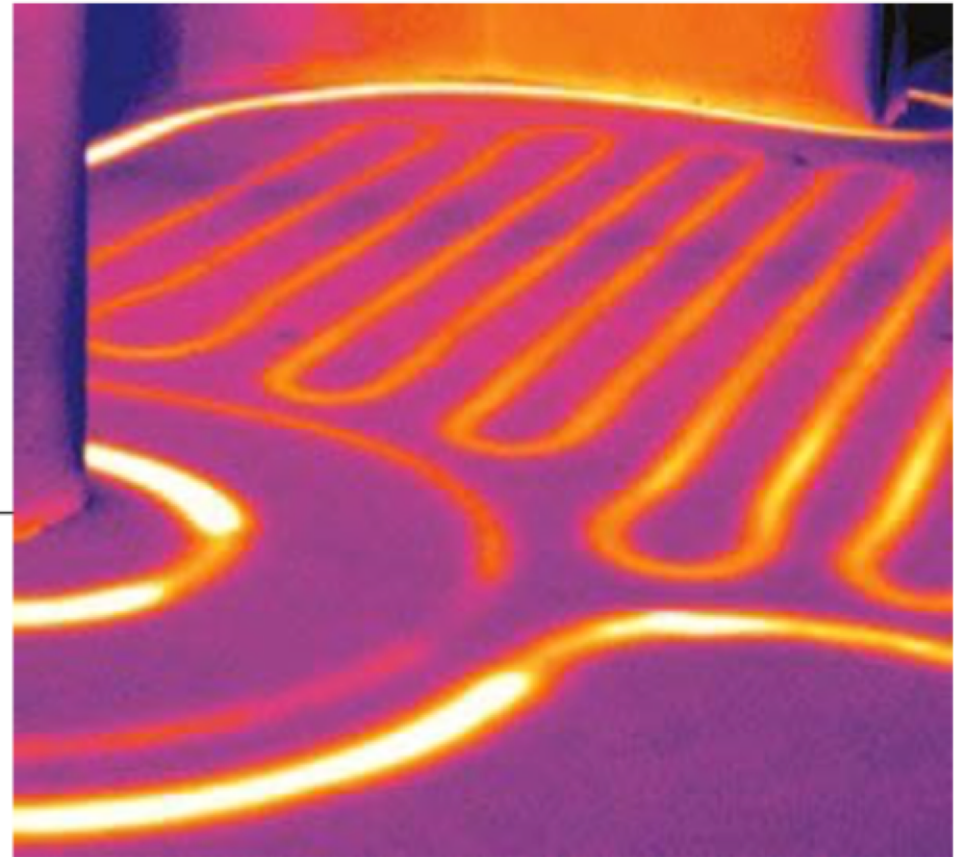
2. Pavimento troppo caldo o troppo freddo.

Il pavimento è in contatto con l'individuo, con cui scambia energia per conduzione.

Considerato uomini non scalzi, la UNI 7730/1997 stabiliva che una temperatura del pavimento (T_{pav}) compresa tra 19°C e 26°C è quella idonea a non determinare malessere, anche legato a problemi di circolazione sanguigna.

Come limite superiore sono ammessi 29°C nel caso di impianto di riscaldamento a pavimento.

Tale limite equivale ad accettare una percentuale massima di insoddisfatti, PD, pari al 10%.



Le condizioni ambientali di comfort

3. Correnti d'aria.

Spesso, correnti d'aria che investono la persona producono sensazioni di malessere termico localizzato nella zona del corpo investita. E' stato definito un coefficiente, DR (Draft Risk, cioè rischio da correnti d'aria), che rappresenta la percentuale di insoddisfatti da correnti d'aria.

In passato si riteneva che il discomfort da corrente d'aria dipendesse solo dalla velocità dell'aria; nel nuovo indice, DR, invece, si considera anche l'influenza della T_{ba} e dell'intensità di turbolenza T_u .

A rigore, pertanto, andrebbe valutato DR.

In pratica, garantire velocità dell'aria, ad altezza uomo, non superiori a 0.15 m/s può essere congruo in prima approssimazione



Le condizioni ambientali di comfort

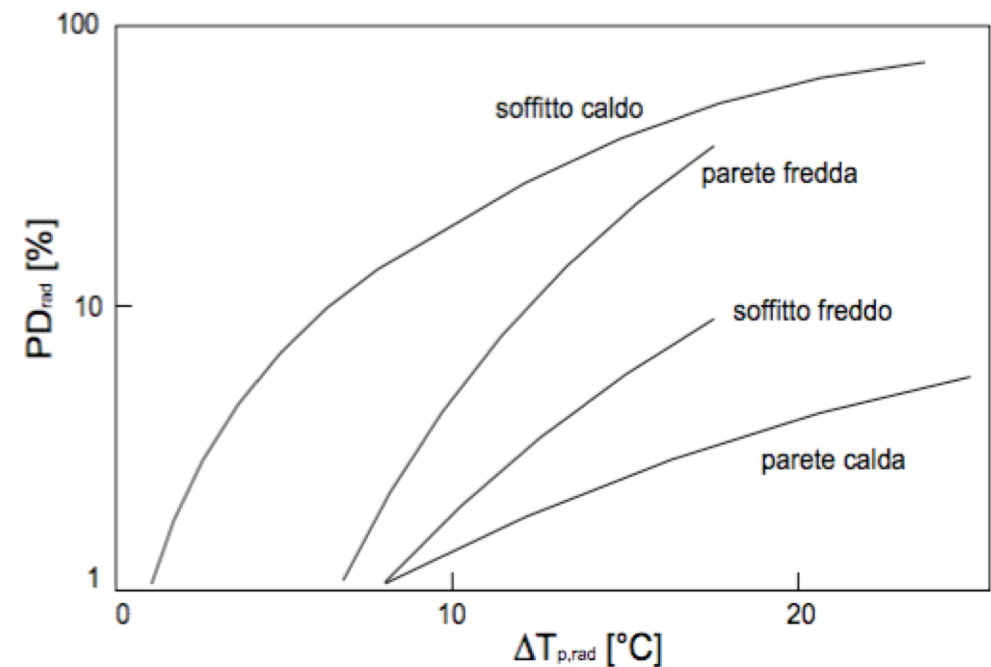
4. Elevata asimmetria della temperatura piana radiante.

L'uomo scambia energia per irraggiamento con le superfici dell'ambiente in cui si trova. Quando questo presenta temperature superficiali molto difformi (ad esempio, da un lato una vetrata sul passaggio innevato e, dall'altro, un focolare acceso) si potrebbero avvertire caldo al viso e freddo alla nuca (o viceversa).

Ciò determina malessere.

La differenza di temperatura piana radiante può risultare elevata in presenza di un camino, o di ampie superfici vetrate o di un impianto di riscaldamento a parete, a soffitto o a pavimento. In questi casi possono verificarsi situazioni di discomfort localizzato.

Si hanno percentuali di insoddisfatti, PD_{rad} , diverse a seconda del tipo di situazione in cui ci si trova.



FINE