

IL COMFORT TERMICO



IL COMFORT TERMICO

CONTENUTI

	<i>Pagina</i>
<i>Il comfort termico</i>	3
<i>Il sistema di termoregolazione del corpo umano</i>	4
<i>La valutazione dell'ambiente termico</i>	5
<i>La valutazione dell'energia metabolica</i>	8
<i>La valutazione della resistenza termica dell'abbigliamento</i>	9
<i>I parametri ambientali da misurare</i>	10
<i>Cosa è e come si misura la temperatura media radiante</i>	11
<i>La temperatura operativa, la temperatura equivalente e la temperatura efficace</i>	12
<i>Metodi di misura diretta della temperatura operativa e della temperatura equivalente</i>	13
<i>Come realizzare le condizioni di comfort termico</i>	14
<i>Gli indici PMV e PPD</i>	15
<i>Il discomfort termico locale</i>	16
<i>Il discomfort da corrente d'aria</i>	17
<i>Il discomfort da asimmetria media radiante</i>	19
<i>Il discomfort da differenza verticale della temperatura dell'aria</i>	20
<i>Il discomfort da temperatura del pavimento</i>	21
<i>Come effettuare una misura in un ambiente lavorativo</i>	22
<i>Come valutare le condizioni termometriche in un ambiente</i>	23
<i>Letture di approfondimento</i>	24

APPENDICE

<i>A: Calcolo della potenza termica dispersa per irraggiamento e convezione (potenza termica secca)</i>	25
<i>B: Equazioni di bilancio di energia, del comfort e del PMV</i>	26
<i>C: Tabella dei valori met</i>	27
<i>D: Tabella dei valori di clo</i>	28
<i>E: Calcolo della temperatura media radiante</i>	30
<i>F: Calcolo della temperatura piana radiante e della temp. Operativa</i>	31

SIMBOLOGIA

32

IL COMFORT TERMICO

L'uomo si è sempre sforzato di creare un ambiente termico confortevole, come testimoniato da tutte le tradizioni architettoniche del mondo, dal passato al giorno d'oggi. Ancor oggi, creare un ambiente confortevole dal punto di vista termico, è uno degli obiettivi più importanti da raggiungere nella progettazione degli edifici.

Ma cos'è esattamente il comfort termico? Nella norma UNI-EN-ISO 7730 viene definito come: "Quella condizione mentale di soddisfazione nei riguardi dell'ambiente termico"; evidentemente si tratta di una definizione che può incontrare molti consensi ma che non è traducibile in parametri fisici.

La complessità nel valutare il comfort termico è illustrata nel disegno. Ambedue le persone sono in condizioni di comfort termico anche se i due ambienti termici sono completamente differenti. Questo perché il comfort termico è determinato da diversi parametri fisici e non da uno solo, come, per esempio, la temperatura dell'aria.

In una valutazione complessiva dell'ambiente lavorativo bisogna tener conto anche di altri fattori quali la qualità dell'aria, la luce ed il rumore. Se troviamo che l'ambiente in cui lavoriamo ogni giorno non sia confortevole dal punto di vista termico, ne soffre anche il nostro rendimento. In definitiva, il comfort termico ha una notevole influenza sulla nostra efficienza lavorativa.



IL SISTEMA DI TERMOREGOLAZIONE DEL CORPO UMANO

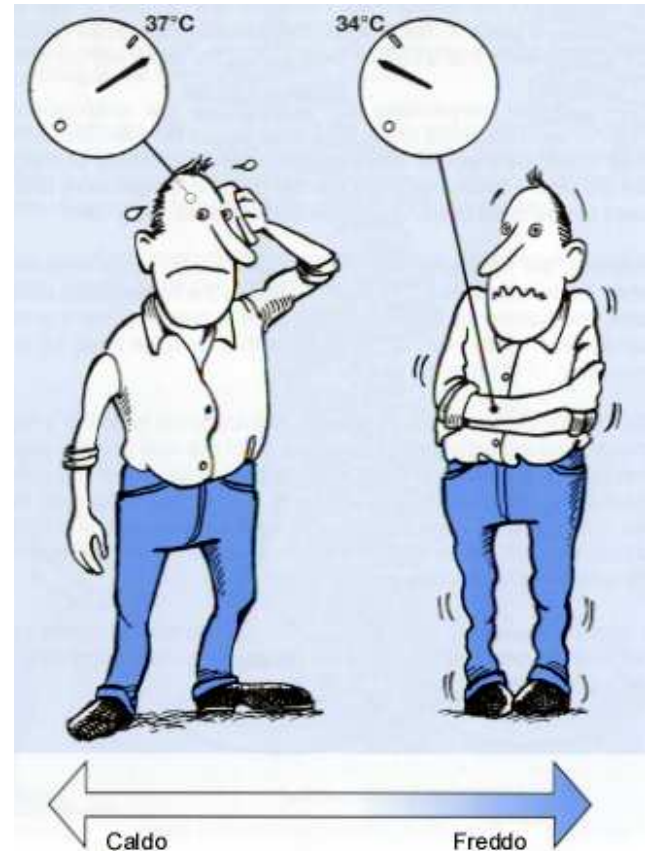
L'uomo ha un sistema di termoregolazione molto efficiente che mantiene la temperatura interna del corpo ad un valore di circa 37°C.

Quando la temperatura aumenta troppo vengono attivati due processi: inizialmente, la dilatazione dei vasi sanguigni fa aumentare il flusso ematico nella pelle, successivamente si inizia a sudare. La sudorazione è un ottimo metodo di raffreddamento in quanto l'energia utilizzata dal sudore per evaporare viene sottratta alla pelle. Un aumento della temperatura interna di pochi decimi di grado, può stimolare una sudorazione che quadruplica la dispersione di energia dal corpo.

Se la temperatura interna diminuisce troppo, la prima reazione è la vasocostrizione che riduce il flusso ematico nella pelle. La seconda reazione è l'aumento di generazione di energia all'interno del corpo, che si ha agendo sui muscoli e attivando quindi il brivido. Anche questo sistema è molto efficiente e può aumentare drasticamente la produzione di energia.

Il sistema di controllo che regola la temperatura corporea è molto complesso e il suo funzionamento non è ancora completamente chiaro. Comunque, i due principali gruppi di sensori del sistema di controllo sono noti e sono disposti nella pelle e nell'ipotalamo. Il sensore che si trova nell'ipotalamo si attiva in condizioni di caldo e fa partire il meccanismo di difesa contro il caldo quando la temperatura interna sale oltre i 37°C. I sensori localizzati nella pelle sono sensibili al freddo ed attivano il meccanismo di difesa contro il freddo quando la temperatura della pelle scende sotto i 34°C.

Se i sensori (caldo e freddo) inviano segnali contemporaneamente, il nostro cervello inibirà una o tutte e due le reazioni di difesa.



LA VALUTAZIONE DELL'AMBIENTE TERMICO

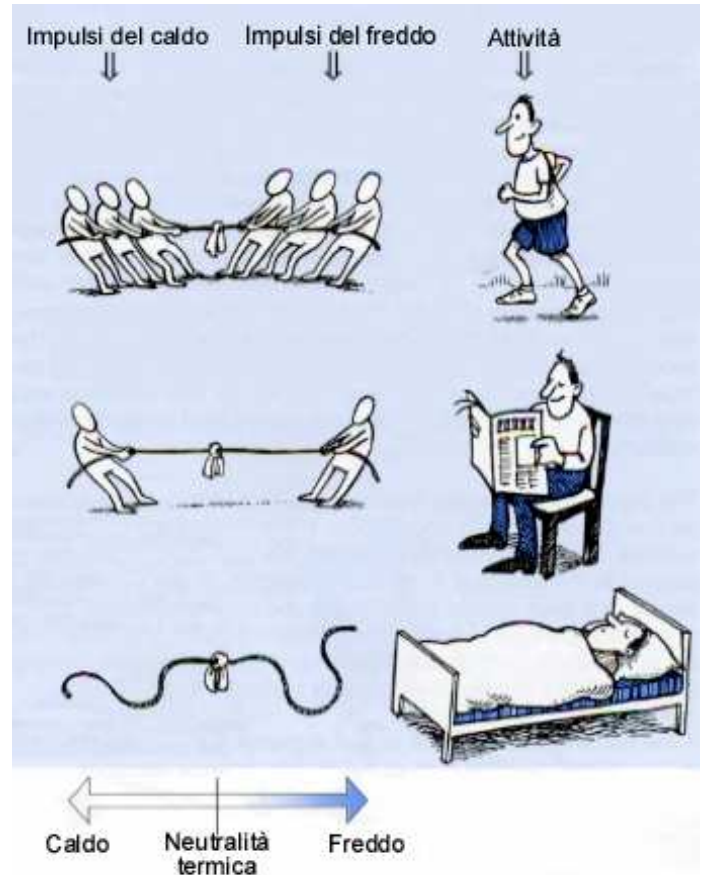
L'uomo considera un ambiente termicamente confortevole se in esso non avverte nessun tipo di disagio termico. La prima condizione per il comfort è la neutralità termica, ovvero quella particolare situazione in cui una persona non sente né troppo freddo né troppo caldo.

Quando la temperatura della pelle scende sotto i 34°C , i sensori del freddo iniziano ad inviare segnali al cervello; se la temperatura continua a scendere i segnali aumentano. Il numero di segnali è anche funzione della velocità di variazione della temperatura: con l'aumentare di tale velocità aumenta il numero di segnali.

Analogamente, il sensore nell'ipotalamo invia segnali quando la temperatura supera i 37°C e, all'aumentare della temperatura, aumenta il numero di segnali. Si ritiene che i segnali di questi due sensori siano alla base della nostra valutazione sull'ambiente termico.

L'interpretazione dei segnali da parte del cervello può essere paragonata ad un tiro alla fune, con i sensori del caldo e del freddo che rappresentano le due estremità. Se i segnali provenienti da ambedue le parti hanno la stessa ampiezza, si raggiunge la neutralità termica, altrimenti si sente o troppo freddo o troppo caldo. Una persona in condizioni di neutralità termica, completamente rilassata, costituisce un caso a parte, perché non attiva né i sensori del caldo né quelli del freddo.

Perché la temperatura interna vari ci vuole un po' di tempo; i segnali provenienti dal sensore del calore determinano variazioni molto più lente rispetto a quelli provenienti dal sensore del freddo.



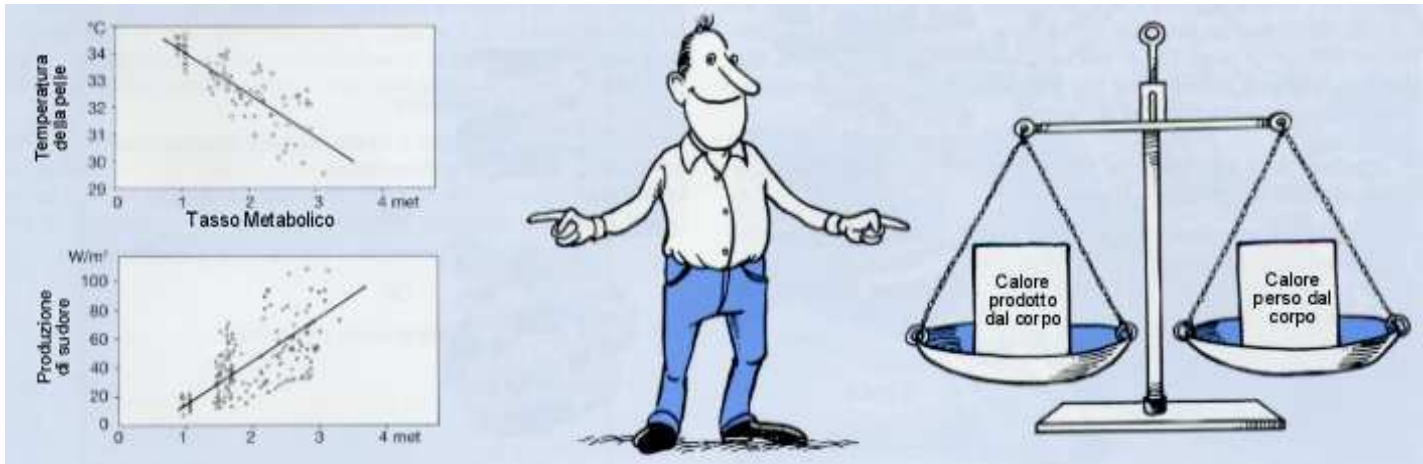
Per mantenere il comfort termico devono essere soddisfatte due condizioni. La prima è che la combinazione della temperatura della pelle e della temperatura interna fornisca la sensazione di neutralità termica. La seconda è che il bilancio di energia sul corpo umano sia soddisfatto: l'energia metabolica prodotta deve essere uguale alle dispersioni verso l'ambiente.

Sulla base di un elevato numero di esperimenti, in condizione di neutralità termica, è stata ricavata la relazione tra i seguenti parametri: temperatura della pelle, temperatura interna ed attività fisica. Durante questi esperimenti sono state misurate la temperatura interna, la temperatura della pelle e la quantità di sudore prodotto; tutto ciò a vari livelli noti di attività, su persone in condizione di comfort termico. I risultati degli esperimenti sono mostrati in figura.

La sudorazione prodotta è stata scelta come parametro al posto della temperatura corporea interna, ma considerato che la produzione di sudore è funzione della temperatura interna e della temperatura della pelle, ciò non provoca variazioni al modello della sensazione termica.

In questi esperimenti è stato osservato che non vi è alcuna differenza tra l'età, il sesso, la razza e l'origine geografica nel determinare cos'è un ambiente termicamente confortevole. Vi sono, invece, delle differenze tra individui esposti allo stesso ambiente termico.

Le equazioni di bilancio di energia sul corpo umano sono relativamente semplici e sono riportate in appendice B.



Le equazioni che forniscono il valore della temperatura della pelle e quello della sudorazione prodotta in condizioni di comfort possono essere combinate con il bilancio di energia sul corpo umano per ottenere l'Equazione del Comfort che descrive la relazione tra i parametri fisici microclimatici e la sensazione di neutralità termica per una persona "media".

L'equazione del comfort fornisce uno strumento operativo che, a partire dalla misura dei parametri microclimatici, ci permette di valutare le condizioni alle quali viene garantito nell'ambiente lavorativo il comfort termico.

L'equazione, riportata nelle appendici A e B, è stata elaborata da P.O. Ranger (rif. bibl. 1), ed è troppo complicata per un calcolo aritmetico manuale, per cui viene di norma risolta usando il computer. Dall'equazione si ricava che la temperatura delle superfici di un ambiente chiuso, in cui si trova una persona, ha una grande influenza sulla sensazione termica. La variazione di 1° C della temperatura superficiale, in molte circostanze, può avere un' influenza sulla sensazione termica di un soggetto analoga alla variazione di 1°C della temperatura dell'aria.

Sempre dall'equazione del comfort si ricava che il valore dell'umidità relativa ha un' influenza moderata sulla sensazione termica.

In pratica, è necessario conoscere le informazioni sulle grandezze che compaiono nell'equazione e cioè:

1) 2 tabelle che forniscono i valori dell'energia metabolica e della resistenza termica dell'abbigliamento rispettivamente indicati come valori di met e di clo).

2) 2 o 4 parametri misurati che descrivono l'ambiente termico nel posto di lavoro.

Equazione del Comfort

$$M-W=H+E_c+C_{res}+E_{res}$$

dove $E_c = 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - Pa] + 0.42 \cdot (M - W - 58.15)$

$$C_{res} = 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a)$$

$$E_{res} = 1.72 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - Pa)$$

H può essere misurata direttamente oppure calcolata dall'equazione in Appendice A.

Cosa valutare:

Il valore dell'energia metabolica (met)

Il valore della resistenza termica dell'abbigliamento (clo)

Cosa misurare:

Temperatura dell'aria + temp. media radiante + velocità dell'aria + umidità relativa

oppure temperatura operativa + velocità dell'aria + umidità relativa

oppure temperatura equivalente + umidità relativa

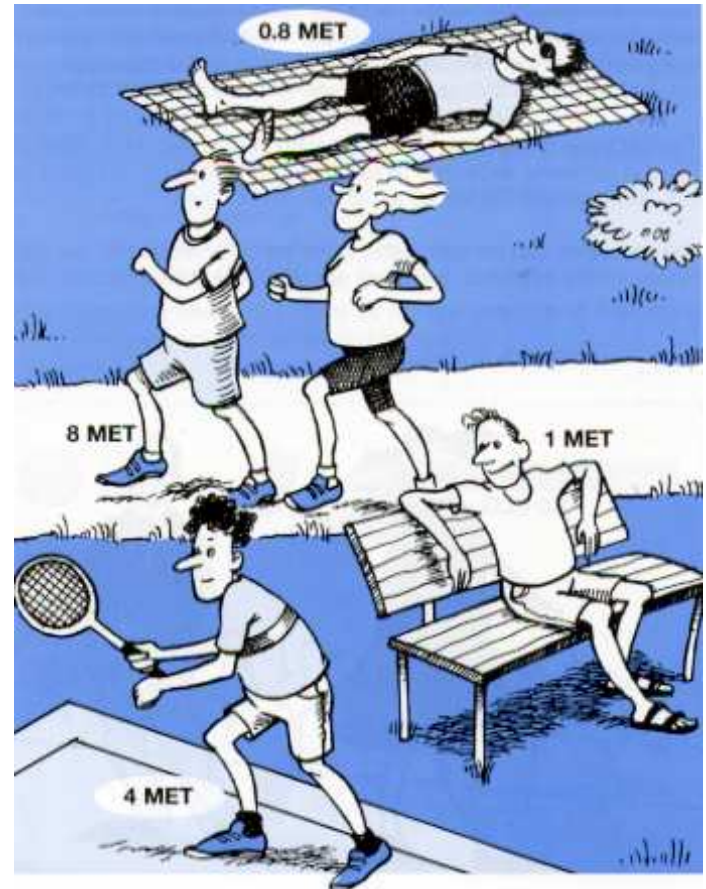
LA VALUTAZIONE DELL'ENERGIA METABOLICA

L'energia metabolica, detta anche tasso metabolico o metabolismo, è il motore del corpo ed il suo ammontare dipende dall'attività muscolare. Normalmente, tutta l'attività muscolare viene trasformata in energia termica; durante lavori fisici pesanti questa trasformazione può limitarsi al 75%; infatti se una persona scala una montagna, parte dell'energia usata viene immagazzinata nel corpo sotto forma di energia potenziale.

Tradizionalmente, il metabolismo viene misurato in met (1 met = 58,15 W/m² di superficie corporea). Un adulto ha una superficie corporea di 1,7 m²; quindi, in condizioni di comfort termico, con un livello di attività pari a 1 met avrà un metabolismo e quindi una dispersione di energia pari a circa 100W.

Il nostro metabolismo raggiunge il minimo durante il sonno (0,8 met) ed il suo massimo durante attività sportive, dove viene spesso raggiunto il valore di 10 met. Nel disegno sono mostrati degli esempi di attività fisica con il corrispondente valore di tasso metabolico. Inoltre, in appendice C, è riportata una tabella di valori di tassi metabolici. Un valore di met comunemente usato è 1,2 che corrisponde al normale lavoro sedentario d'ufficio. È interessante vedere come il lavoro domestico sia relativamente faticoso, con valori di met tra 2,5 e 2,9.

Quando si valuta il tasso metabolico di un individuo, è importante usare un valore medio calcolato sulla base dei valori relativi alle attività svolte dal soggetto nell'ora precedente. Il motivo è che il corpo "ricorda", in modo approssimato, l'ora precedente di attività.



LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA TERMICA DELL'ABBIGLIAMENTO

L'abbigliamento riduce la dispersione di energia dal corpo umano e pertanto è classificato in funzione del livello di isolamento termico fornito. L'unità di misura solitamente usata per la resistenza termica dell'abbigliamento è il clo, anche se spesso si usa l'unità di misura del S.I.: m^2C/W ($1\text{clo} = 0,155m^2C/W$).

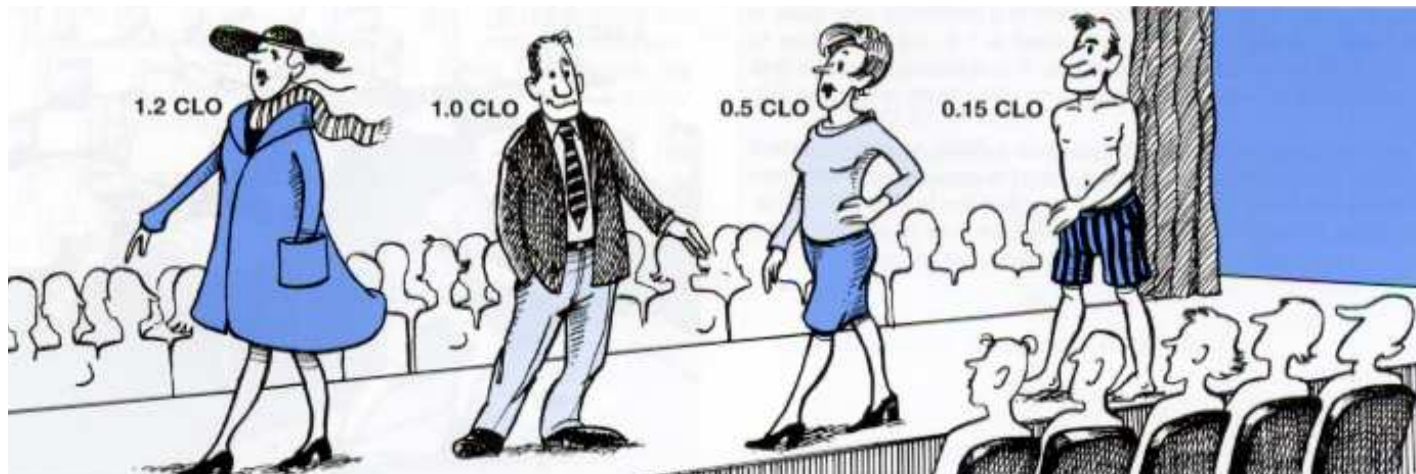
La scala dei clo è strutturata in modo che ad una persona nuda corrisponda un valore di 0,0 mentre un abbigliamento maschile da ufficio abbia una resistenza termica pari a 1,0 clo. Alcuni valori di clo sono mostrati in figura.

Il valore totale della resistenza termica dell'abbigliamento può essere calcolato se si conoscono i capi di vestiario indossati dalla

persona in oggetto con i corrispondenti valori di resistenza, facendo una semplice addizione di questi valori. In appendice D è riportato un elenco di capi di abbigliamento con il corrispondente valore di resistenza termica.

Il valore di resistenza termica dell'abbigliamento (r. t.) ottenuto con questo calcolo è, generalmente, sufficientemente preciso. Se si vogliono valori esatti è meglio misurare il valore di r. t. con un manichino riscaldato.

Quando si calcolano i valori della r. t., è importante ricordare che le sedie tappezzate, i sedili delle macchine ed i letti riducono la dispersione di energia dal corpo e vanno quindi tenuti presenti nel calcolo totale.



I PARAMETRI AMBIENTALI DA MISURARE

Quando si misurano i parametri termoigrometrici in un ambiente confinato, è importante ricordare che la sensazione termica dell'uomo non dipende dalla temperatura dell'ambiente, ma dalla quantità di energia dispersa verso l'ambiente. I parametri da misurare sono quelli che influenzano il bilancio di energia:

Temperatura dell'aria	t_a	(°C)
Temperatura media radiante	t_r	(°C)
Velocità dell'aria	v_a	(m/s)
Pressione parziale	p_a	(Pa)

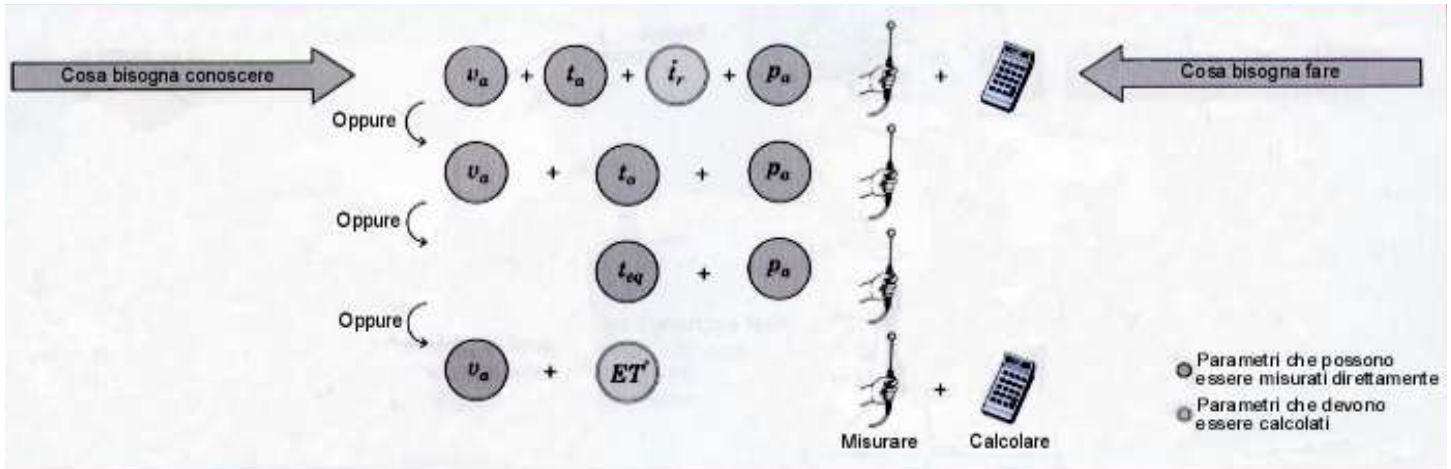
Questi parametri non influiscono sulla dispersione di energia in modo uguale e non è sufficiente misurarne uno solo. Per esempio, la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria hanno generalmente la stessa influenza sulla dispersione.

Per caratterizzare un ambiente termico confinato, usando un numero inferiore di parametri ed evitando di misurare la temperatura media radiante (il cui calcolo è laborioso), sono stati introdotti dei parametri integrati. I tre più importanti sono la temperatura operativa (t_o), la temperatura equivalente (t_{eq}) e la temperatura efficace (ET^*).

I parametri integrati combinano l'influenza dei singoli parametri sulla dispersione di energia nella maniera seguente:

t_o	effetto integrato di $t_a + t_r$
t_{eq}	effetto integrato di $t_a + t_r + v_a$
ET^*	effetto integrato di $t_a + t_r + p_a$

I parametri integrati permettono di descrivere l'ambiente termico utilizzando un numero ridotto di grandezze.



COSA E' E COME SI MISURA LA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

La temperatura media radiante (\bar{t}_r) di un ambiente è definita come quella temperatura uniforme di una cavità in cui una perdita di calore per radiazione è uguale a quella di una persona in esame in una stanza reale.

L'equazione per il calcolo della temperatura media radiante è:

$$\bar{t}_r = \sqrt[4]{\sum_1^n F_{p-i} * (t_i + 273)^4 - 273}$$

t_i = temperatura della superficie di area i (°C)

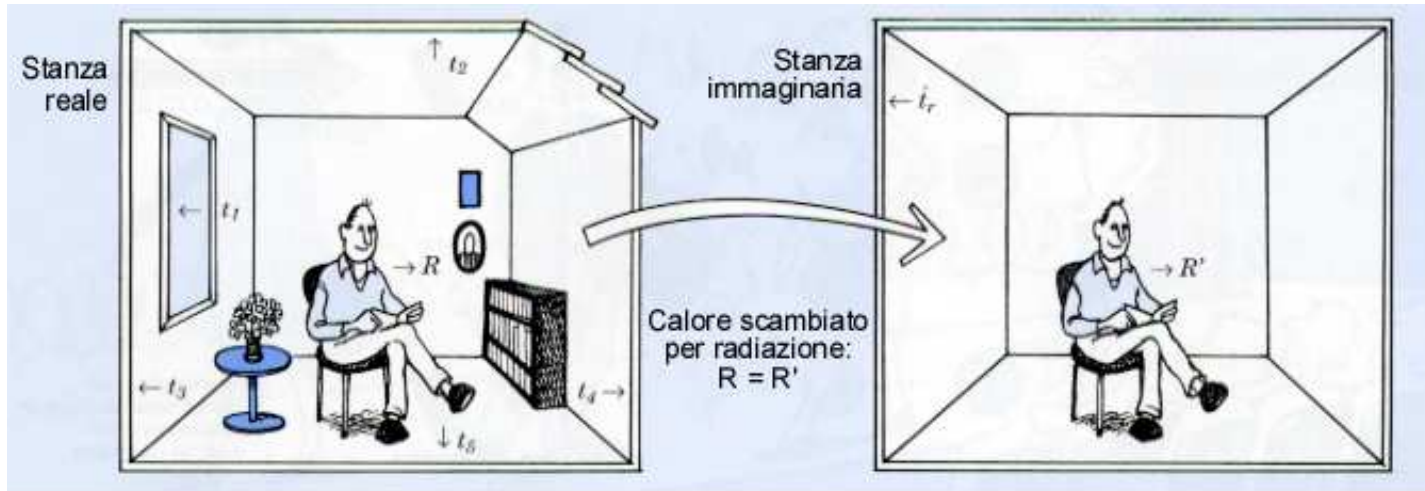
F_{p-i} = fattore di vista tra la persona e la superficie i $\sum F_{p-i} = 1$

La misura di tutte le temperature superficiali di un ambiente, così come il calcolo dei corrispondenti fattori di vista, richiede molto

tempo per cui è da evitare se possibile.

Per il calcolo della temperatura media radiante possono essere usate la temperatura di globo, la temperatura dell'aria e la velocità dell'aria. Il risultato è comunque approssimato, in parte perché i fattori di vista tra il globo e le superfici della stanza sono diversi da quelli tra la persona e le stesse superfici, in parte a causa dell'incertezza sul valore della conduttanza convettiva nello scambio termico globo-aria.

In appendice E sono riportate le equazioni per il calcolo della temperatura media radiante a partire dalla temperatura di globo e la procedura per il calcolo della temperatura media radiante a partire dalle temperature piane radianti.



LA TEMPERATURA OPERATIVA, LA TEMPERATURA EQUIVALENTE E LA TEMPERATURA EFFICACE

Il criterio secondo cui sono definite e calcolate le temperature integrate può essere spiegato sulla base delle figure riportate in questa pagina ed è lo stesso per tutte e tre le temperature.

Si immagini di prendere una persona e di trasferirla da una stanza reale ad una immaginaria e di modificare poi la temperatura della stanza fittizia, fino a realizzare la stessa dispersione di energia nella stanza immaginaria ed in quella reale. A questo punto si determini la temperatura dell'aria nella stanza immaginaria che, per definizione, è la temperatura integrata.

Ciascuna temperatura integrata è definita nell'ipotesi che nell'ambiente fittizio siano verificate particolari condizioni:

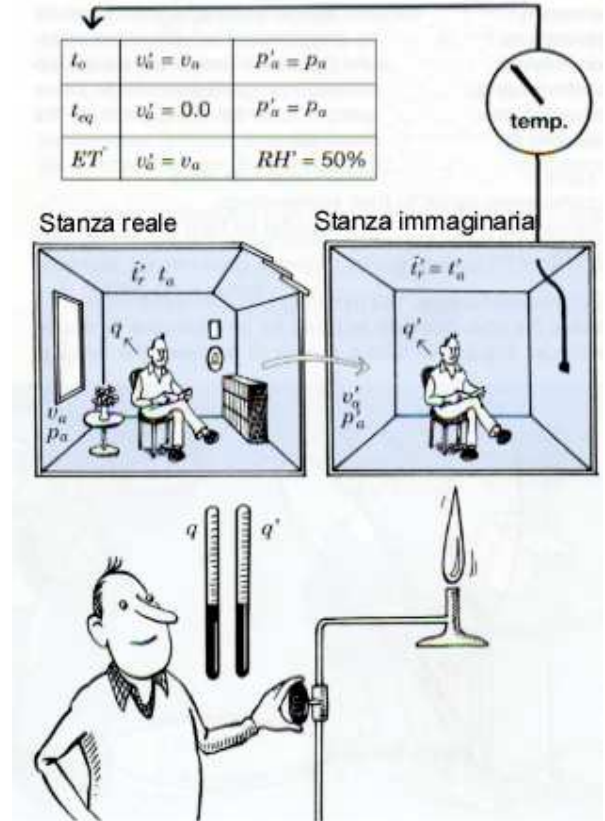
t_o : t'_a uguale a t'_r —
 v'_a e p'_a uguali a quelli
dell'ambiente reale

t_{eq} : t'_a uguale a t'_r
 $v'_a = 0.0$
 p'_a uguale a quello reale

ET^* : t'_a uguale a t'_r —
 v'_a uguale a quello reale
Il valore di p'_a fornisce $RH=50\%$

I valori di ET^* e di t_{eq} dipendono dal livello di attività delle persone e dal modo in cui queste sono vestite.

Il sistema di equazioni per calcolare t_o e t_{eq} è riportato in appendice A. La temperatura operativa può essere calcolata anche usando un'equazione semplificata, (vedere Appendice F). Le equazioni per il calcolo della ET^* si trovano nell'ASHRAE Fundamentals (vedi rif. bibl. 7).



METODI DI MISURA DIRETTA DELLA TEMPERATURA OPERATIVA E DELLA TEMPERATURA EQUIVALENTE

Si può dimostrare che in molte applicazioni la temperatura operativa è uguale alla temperatura di un manichino non riscaldato. Quindi un trasduttore di temperatura operativa deve avere caratteristiche di scambio termico simili a quelle di un manichino non riscaldato; più precisamente il trasduttore ed il manichino devono avere:

1. Scambio radiativo uguale a quello convettivo,
2. Uguali fattori di vista con l'ambiente circostante,
3. Stessa emittenza ad ogni lunghezza d'onda.

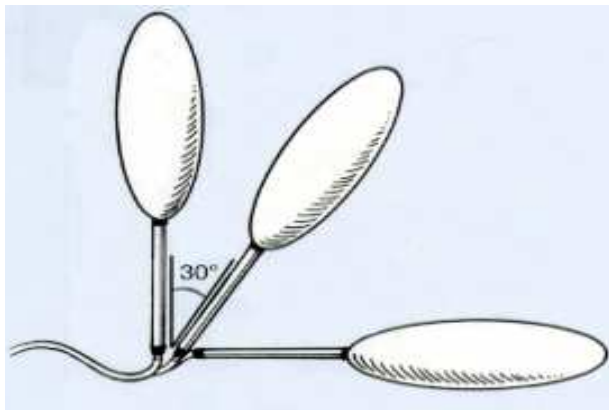
Un dispositivo di forma ellissoidale grigio chiaro, alto 160 mm e con un diametro di 54 mm, soddisfa i requisiti richiesti ad un trasduttore di temperatura operativa; se lo si dota di un sensore di temperatura media superficiale si ottiene un trasduttore per la temperatura operativa.

Considerato che il fattore di vista tra un soggetto e l'ambiente varia al variare della posizione reciproca, il trasduttore deve poter assumere posizioni diverse per poter effettuare misure in diverse posizioni di lavoro.

Riscaldando il trasduttore di temperatura operativa fino al raggiungimento della temperatura superficiale dei vestiti della persona, si può ottenere direttamente il valore della dispersione di energia termica per irraggiamento e convezione dal corpo umano verso l'ambiente, H . Tale valore rappresenta la quantità di energia richiesta per mantenere costante la temperatura superficiale del trasduttore.

Se il valore di H è noto, si può calcolare la temperatura equivalente t_{eq} e viceversa.

L'equazione usata in questo caso è riportata in Appendice A.



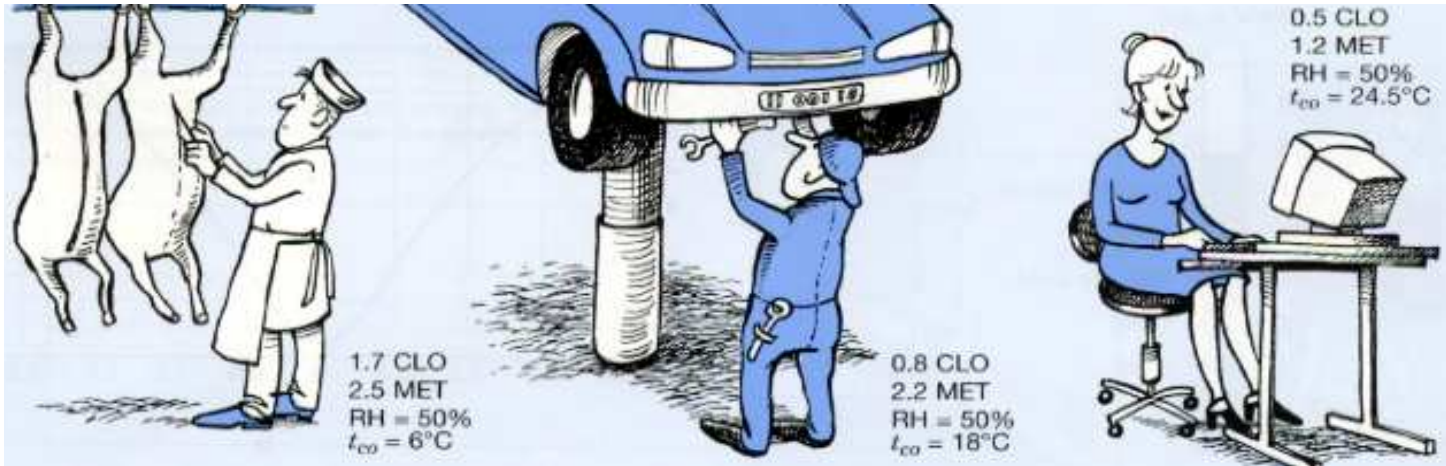
COME REALIZZARE LE CONDIZIONI DI COMFORT TERMICO

Quando si valuta un ambiente di lavoro, si parla spesso di temperatura di comfort (t_{co}), definita come la temperatura equivalente alla quale una persona si sente a suo agio dal punto di vista termico. Si parla raramente di umidità di comfort sia perché è difficile “sentire” l’umidità nell’aria, sia perché in condizioni prossime a quelle di comfort termico, l’umidità ha solo una leggera influenza sullo scambio termico persona-ambiente.

La temperatura di comfort, in un dato ambiente, può essere calcolata con l’equazione del comfort (cfr. Appendice B). Nella figura sono riportati alcuni risultati ottenuti da questo calcolo. Si noti come l’ambiente in cui è presente una persona che svolge un lavoro sedentario e che indossa un leggero abito estivo deve essere più caldo degli altri nell’esempio.

Se un ambiente è occupato da molte persone che indossano abbigliamento diverso e svolgono attività differenti, può risultare difficile creare condizioni di comfort termico per tutti gli occupanti. In casi del genere si possono cambiare localmente i parametri che incidono sul comfort termico; per esempio, se la temperatura equivalente è minore della temperatura di comfort, la temperatura media radiante può essere aumentata installando pannelli riscaldati.

Fortunatamente, gli individui possono spesso ottimizzare il proprio comfort termico cambiando gli abiti a seconda della situazione termica, per esempio togliendo il maglione, arrotolando le maniche della camicia o indossando una giacca.



GLI INDICI PMV E PPD

Se il comfort termico in un ambiente lavorativo non è perfetto, quanto è lontano dalla perfezione? Entro quali limiti dobbiamo mantenere la temperatura e l'umidità dell'aria per mantenere condizioni di comfort termico?

Le risposte a queste domande possono essere ottenute con l'indice PMV (Voto Medio Previsto, Predicted Mean Vote). L'indice PMV rappresenta il valore medio delle valutazioni soggettive di un gruppo di persone in un dato ambiente.

Il PMV rappresenta la sensazione termica definita su una scala di sette punti: da -3 (molto freddo) a +3 (molto caldo); lo zero rappresenta la neutralità termica.

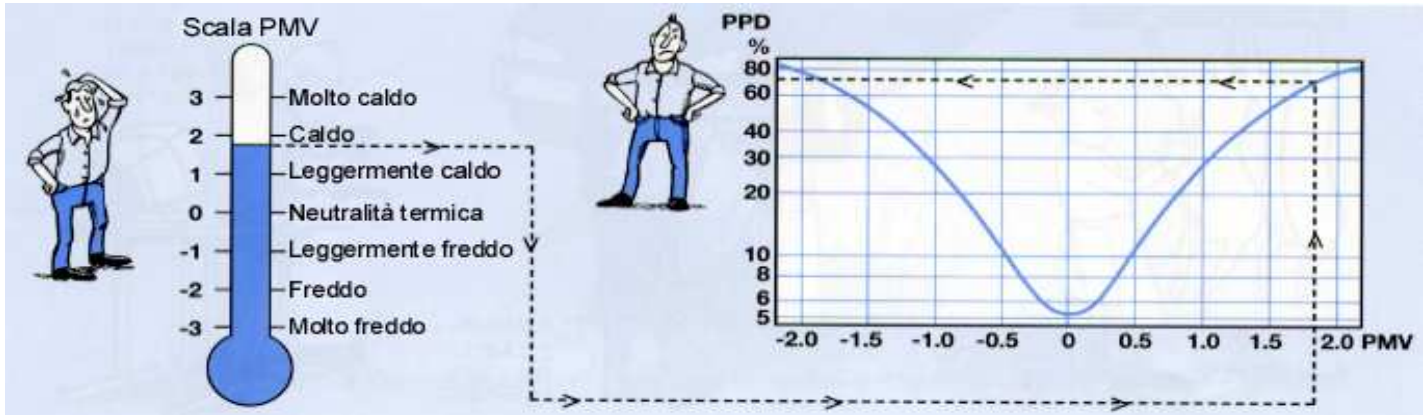
Anche quando l'indice PMV è pari a zero, ci sarà ancora qualcuno insoddisfatto del livello di temperatura. Anche in un ambiente

dove tutte le persone sono pressapoco vestite nella stessa maniera e svolgono in linea di massima, la stessa attività, la valutazione del comfort differisce sempre da individuo ad individuo.

Per prevedere quante persone sono insoddisfatte in un determinato ambiente termico, è stato introdotto l'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Nel valutare l'indice PPD vengono insoddisfatte le persone che votano -3, -2, +2, +3 sulla scala del PMV.

Si noti in figura che la curva non scende mai al di sotto del 5% di insoddisfatti.

Per calcolare gli indici PMV e PPD, si faccia riferimento alla Appendice B.



IL DISCOMFORT TERMICO LOCALE

Una persona che globalmente avverte una sensazione di neutralità termica, può avere parti del corpo esposte a condizioni che comportano un disagio termico; questo disagio termico localizzato non può essere eliminato agendo sulla temperatura di un luogo chiuso, ma è necessario rimuovere le cause del surriscaldamento o del raffreddamento locale.

I fenomeni legati al discomfort termico locale possono essere raggruppati in 4 categorie :

1) Raffreddamento convettivo locale del corpo causato da correnti d'aria.

2) Raffreddamento o riscaldamento di parti del corpo dovuto a irraggiamento termico.

Questo tipo di discomfort è anche conosciuto come “problema dell'asimmetria di radiazione”.

3) La situazione in cui vi sono contemporaneamente piedi freddi e testa calda è causata da elevate differenze verticali di temperatura dell'aria.

4) Piedi caldi o freddi possono essere causati dalla temperatura non confortevole del pavimento.

E' necessario ricordare che per valutare termicamente un ambiente è necessario verificare sia il comfort termico locale che quello globale.



IL DISCOMFORT DA CORRENTE D'ARIA

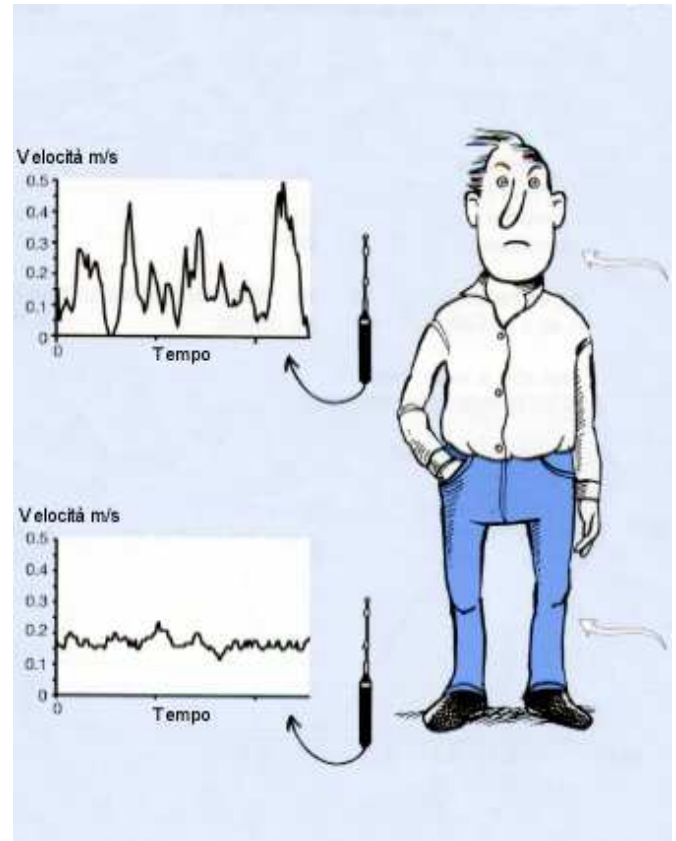
Quando si parla di condizioni termoigrometriche negli edifici dotati di aria condizionata, nei veicoli e negli aeroplani, le correnti d'aria rappresentano la causa più comune di lamentele. L'uomo non riesce a sentire la velocità dell'aria, così, quello di cui si lamenta sono indesiderati raffreddamenti locali del corpo. Le persone sono più sensibili alle correnti d'aria sulle parti scoperte del corpo: infatti, le correnti d'aria sono più sentite sul viso, sulle mani e sulla parte inferiore delle gambe.

La quantità di energia termica dispersa dal corpo a causa delle correnti d'aria dipende dalla temperatura, dalla velocità media e dalla turbolenza dell'aria.

Il discomfort, grazie al funzionamento dei sensori del freddo localizzati nella pelle, dipende non solo dal flusso termico locale, ma anche dalla fluttuazione della temperatura della pelle. Un flusso d'aria caratterizzato da elevata turbolenza è molto più fastidioso di uno a bassa turbolenza, anche se entrambi determinano la stessa perdita di energia termica.

Si ritiene che siano i continui abbassamenti della temperatura della pelle, causati dalle fluttuazioni dell'aria a provocare l'invio dei segnali di disagio termico dai sensori del freddo.

Qualcosa si conosce sulla relazione che lega il tipo di fluttuazione al livello di discomfort. Grazie ad esperimenti condotti su gruppi di persone esposti a velocità dell'aria caratterizzate da frequenze di fluttuazione diverse, si è giunti alla conclusione che una fluttuazione con una frequenza di 0,5 Hz è fortemente disagiata, mentre le frequenze sopra i 2 Hz non vengono avvertite.



La percentuale di persone che si prevede possano essere insoddisfatte a causa di una corrente d'aria, può essere calcolata usando la seguente equazione :

$$DR = (34 - t_a) * (v_a - 0.05)^{0.62} * (37 * SD + 3.14)$$

dove :

DR Rischio da corrente d'aria [%]

t_a Temperatura dell'aria [°C]

v_a Velocità media locale dell'aria [m/s]

SD Deviazione standard della velocità dell'aria [m/s]

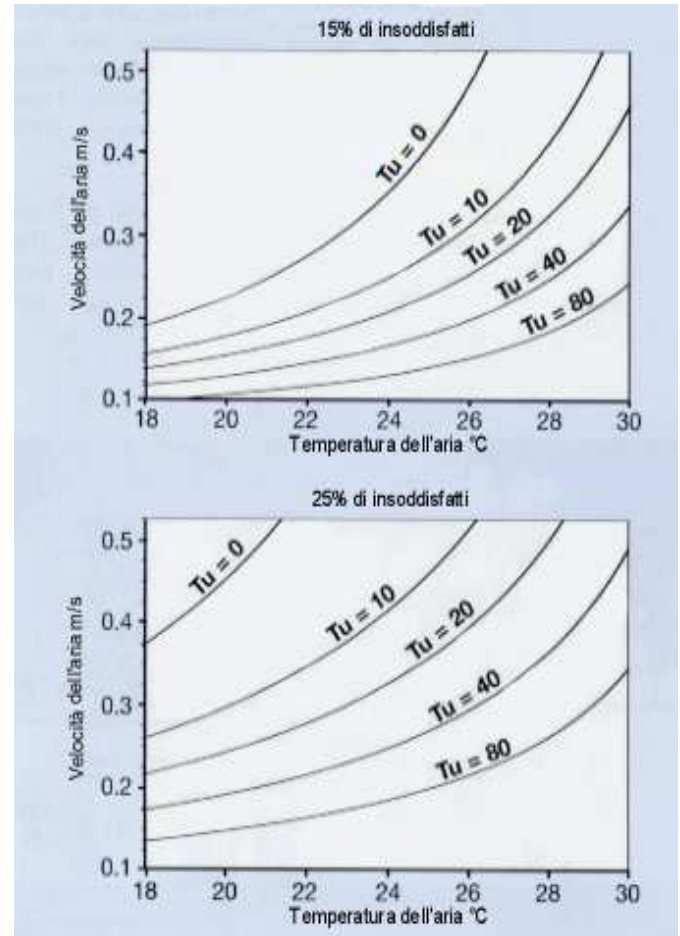
Per descrivere come fluttua la velocità dell'aria, spesso si usa il termine "Intensità di Turbolenza", definita come:

$$Tu = 100 * SD / v_a \quad [\%]$$

L'equazione del rischio da corrente d'aria è tratta dalla norma UNI EN ISO 7730 ed è basata su studi condotti su 150 soggetti. L'equazione viene applicata su persone che svolgono principalmente attività sedentarie, con una sensazione termica vicina a quella di neutralità. I valori di v_a e SD sono valori medi calcolati su un intervallo di 3 minuti.

Il trasduttore da utilizzare per una misurazione del rischio di corrente d'aria deve soddisfare molte specifiche. Deve essere in grado di misurare la velocità dell'aria almeno fino ad un valore minimo di 0.05 m/s; fluttuazioni fino ad un valore massimo di 2 Hz almeno e non deve essere influenzabile dalla direzione del flusso d'aria.

A basse velocità, la direzione del flusso d'aria nella zona occupata cambia rapidamente, per cui è impossibile posizionare un trasduttore di velocità dell'aria in una particolare direzione; ne consegue che bisogna usare un trasduttore omni-direzionale.



IL DISCOMFORT DA ASIMMETRIA MEDIA RADIANTE

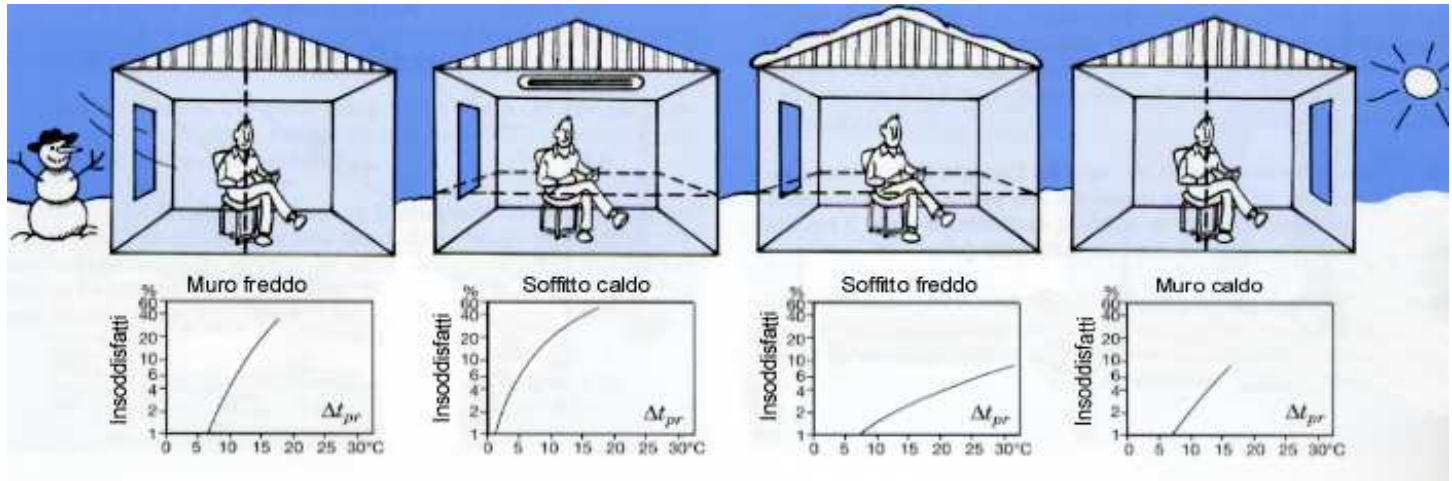
Se si sta in piedi di fronte ad un falò ardente in un giorno di freddo, dopo un po' di tempo si sentirà la parte posteriore del corpo fastidiosamente fredda. A questo disagio non si può ovviare mettendosi più vicini al fuoco, perché ne risulterebbe un aumento della temperatura corporea. Questo è un esempio di quanto una radiazione termica non uniforme possa essere causa di una sensazione di discomfort per il corpo.

Per rappresentare questa non uniformità del campo radiante, viene usata la grandezza asimmetria media radiante, anche detta asimmetria della temperatura radiante (Δt_{pr}), definita come la differenza tra la temperatura piana radiante (t_{pr}) delle due facce opposte di un elementino piano.

Gli esperimenti condotti su persone esposte a variazioni della

asimmetria di temperatura radiante, hanno dimostrato che i soffitti caldi e le finestre fredde sono la causa dei maggiori disagi termici. Durante questi esperimenti tutte le altre superfici della stanza e l'aria sono state mantenute ad uguale temperatura.

Il valore dell'asimmetria di temperatura radiante (Δt_{pr}) può essere ottenuto in due modi: misurando la t_{pr} in due direzioni opposte, usando un trasduttore che integri le radiazioni in arrivo su un elementino piano dal semispazio che lo circonda; oppure misurando le temperature di tutte le superfici circostanti e calcolando poi l'asimmetria di temperatura radiante. In Appendice F sono riportate le procedure per effettuare questi calcoli.



IL DISCOMFORT DA DIFFERENZA VERTICALE DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA

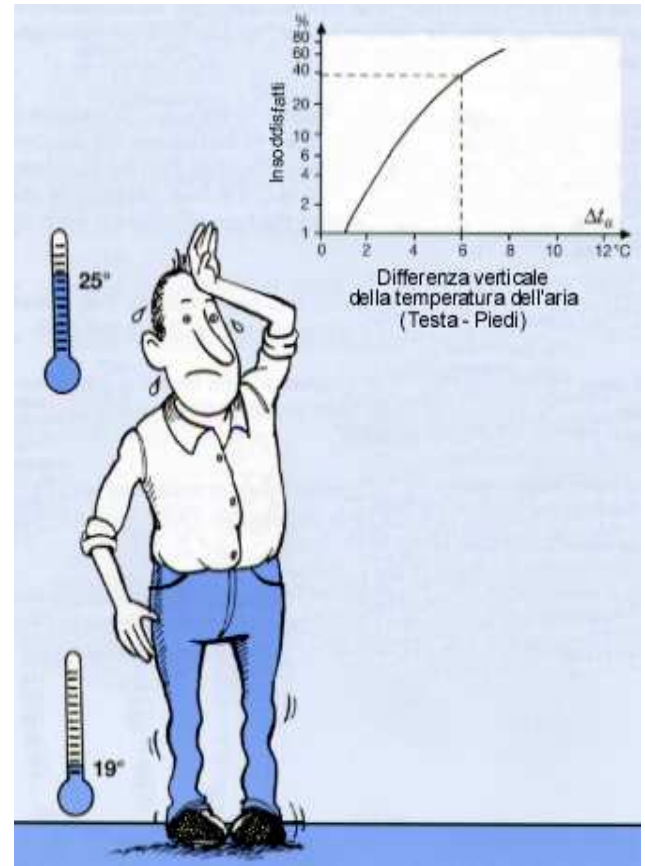
Generalmente non è piacevole sentire caldo alla testa ed allo stesso tempo avvertire freddo ai piedi, a prescindere dal fatto che ciò sia causato da irraggiamento o convezione.

Nel paragrafo precedente abbiamo visto i limiti di accettabilità della asimmetria media radiante. Ora prenderemo in esame i limiti di accettabilità della differenza di temperatura dell'aria tra la testa ed i piedi.

Sono stati fatti degli esperimenti con persone in stato di neutralità termica; i risultati, riportati nel diagramma, mostrano che 3°C di differenza nella temperatura dell'aria tra la testa ed i piedi determinano una percentuale di insoddisfatti pari al 5%. I 3°C sono riportati come livello di accettabilità nella UNI-EN-ISO 7730 per una persona seduta che svolge un'attività sedentaria.

Quando si misurano le differenze della temperatura dell'aria è importante utilizzare un trasduttore schermato rispetto alle radiazioni termiche. Questo assicura che venga misurata solo la temperatura dell'aria e non una combinazione di temperatura dell'aria e temperatura media radiante.

La differenza verticale della temperatura dell'aria viene espressa come la differenza tra la temperatura dell'aria a livello della caviglia e la temperatura dell'aria a livello del collo.



IL DISCOMFORT DA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO

Il discomfort locale ai piedi, dovuto al contatto diretto con il pavimento, può essere spesso determinato da una temperatura di quest'ultimo troppo alta o troppo bassa.

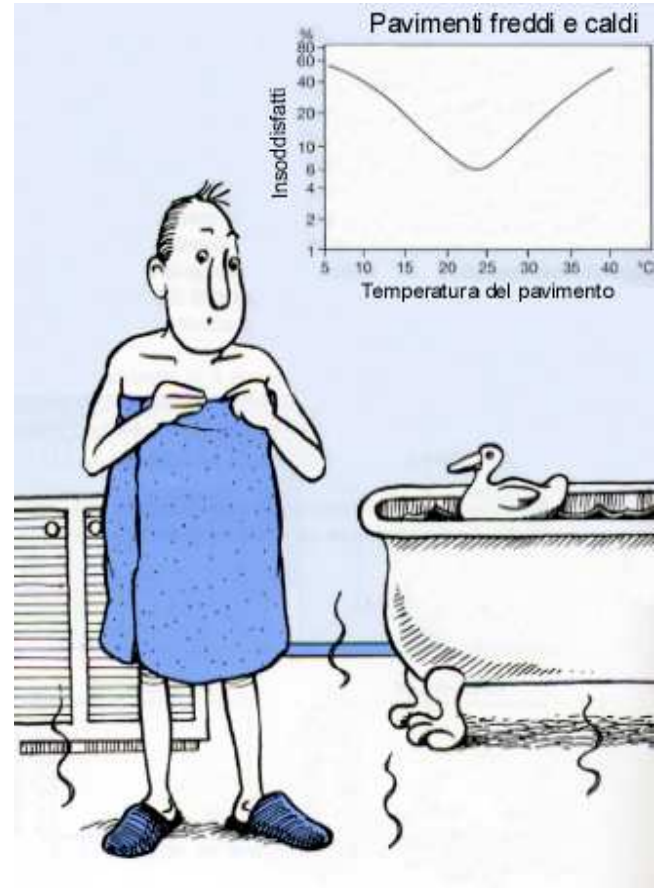
Parlare di discomfort causato dalla temperatura del pavimento non è corretto in quanto è lo scambio termico attraverso i piedi che produce il discomfort. Questo scambio dipende anche da altri parametri oltre che dalla temperatura del pavimento; di grande importanza sono la conducibilità termica e la capacità termica del materiale di cui è fatto il pavimento e il tipo di calzature indossato.

Il motivo per cui un pavimento di sughero dà una sensazione termica di caldo, mentre un pavimento di marmo dà una sensazione di freddo è nella differenza tra i valori di conducibilità termica e capacità termica esistente tra i due materiali.

Se le persone indossano normali calzature da casa, il materiale di cui è fatto il pavimento è meno importante; in ogni caso è stato possibile stabilire dei livelli di comfort proprio per questa situazione "normale".

La norma UNI/EN/ISO 7730 fissa i livelli di comfort per una attività sedentaria in corrispondenza di una percentuale di insoddisfatti pari al 10%, il che porta a considerare accettabile una temperatura del pavimento variabile tra 19°C e 29°C.

I limiti di temperatura del pavimento nel caso di persone a piedi nudi sono leggermente differenti: in un bagno la temperatura ottimale è pari a 29°C per un pavimento in marmo e a 26°C per un pavimento di linoleum su legno.



COME EFFETTUARE UNA MISURA NELL'AMBIENTE LAVORATIVO

Dove devono essere posizionati i trasduttori durante una misura in un ambiente di lavoro ? In figura vengono mostrate le posizioni solitamente prescelte per persone che stanno in piedi o sedute.

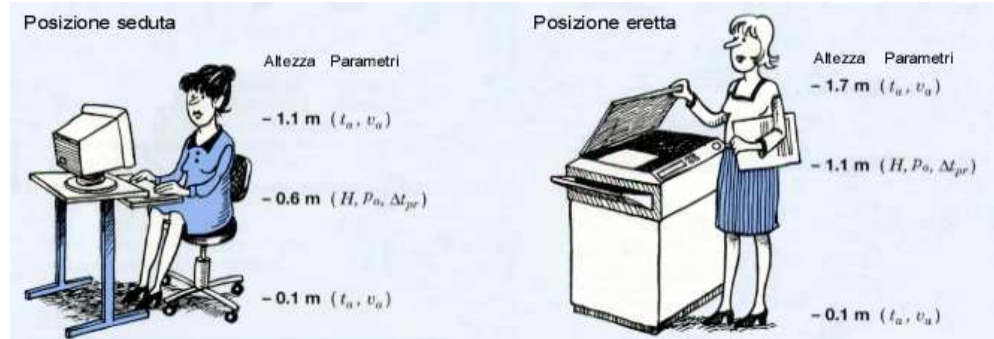
In genere, i trasduttori devono essere posizionati in corrispondenza del baricentro della persona, tranne quando vengono misurate le differenze verticali di temperatura dell'aria e le correnti d'aria, nel qual caso le misure devono essere effettuate sia a livello del collo sia a livello delle caviglie.

A seconda del metodo scelto per misurare la potenza termica dispersa per irraggiamento e convezione (H), sono necessari uno, due o tre trasduttori. Le opzioni sono :

- Un trasduttore per la misura di H
- Un trasduttore per la temperatura operativa ed uno per la velocità dell'aria
- Un trasduttore per la temperatura media radiante, uno per la temperatura dell'aria ed uno per la velocità dell'aria

Perché siano verificate le condizioni di comfort termico in ambiente lavorativo per attività sedentarie, la UNI EN ISO 7730 fornisce questi requisiti:

1. $-0.5 < PMV < +0.5$
2. $DR < 15\%$ al collo e alla caviglia
3. Le differenze verticali della temperatura dell'aria livello caviglia-livello testa devono essere minori di 3°C
4. L'asimmetria della temperatura radiante da finestre fredde deve essere minore di 10°C
5. L'asimmetria della temperatura radiante dal soffitto caldo deve essere minore di 5°C
6. La temperatura superficiale del pavimento deve essere compresa tra i 19°C ed i 29°C
7. L'umidità relativa deve essere compresa tra il 30% ed il 70%.



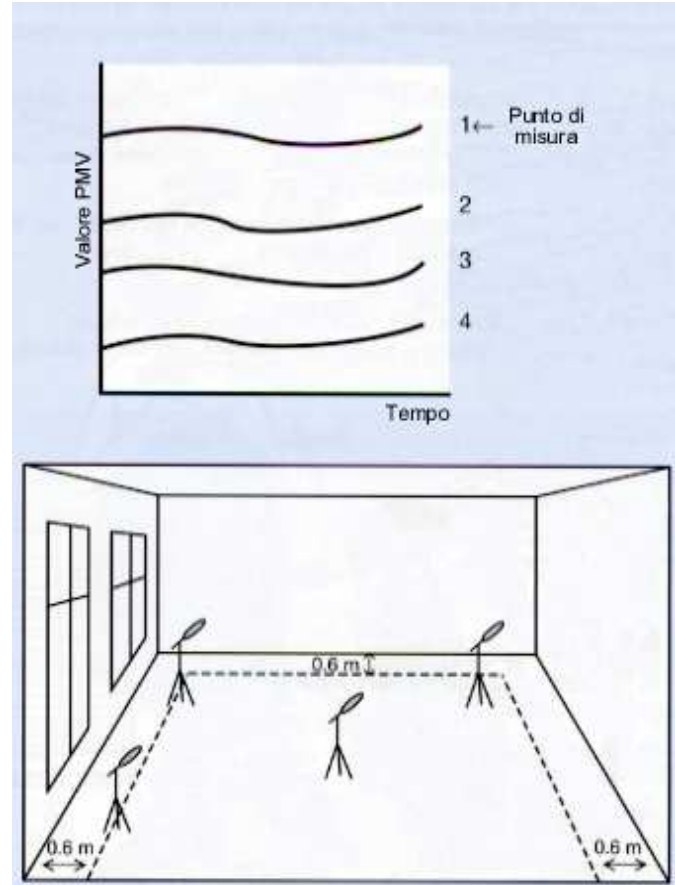
COME VALUTARE LE CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE IN UN AMBIENTE

In ambiente con diverse postazioni di lavoro ed un unico sistema di climatizzazione la valutazione delle condizioni termoigrometriche va fatta secondo la seguente procedura.

- 1) **Verifica dell'omogeneità dell'ambiente termico:** si effettua valutando il PMV contemporaneamente al centro dell'ambiente e in corrispondenza di alcune postazioni di lavoro, tra le quali quelle che si ritiene siano la più calda e la più fredda.
- 2) **Verifica della stazionarietà:** si effettua facilmente controllando che i valori dei parametri misurati in un certo intervallo di tempo non varino.
- 3) **Verifica del discomfort locale:** si effettua, per ogni postazione di lavoro, come descritto in precedenza.

In ambienti in cui le postazioni di lavoro non sono facilmente identificabili, il punto di misurazione dovrebbe essere posto almeno a 0,6 metri di distanza dalle pareti o da sistemi fissi di riscaldamento o di aria condizionata.

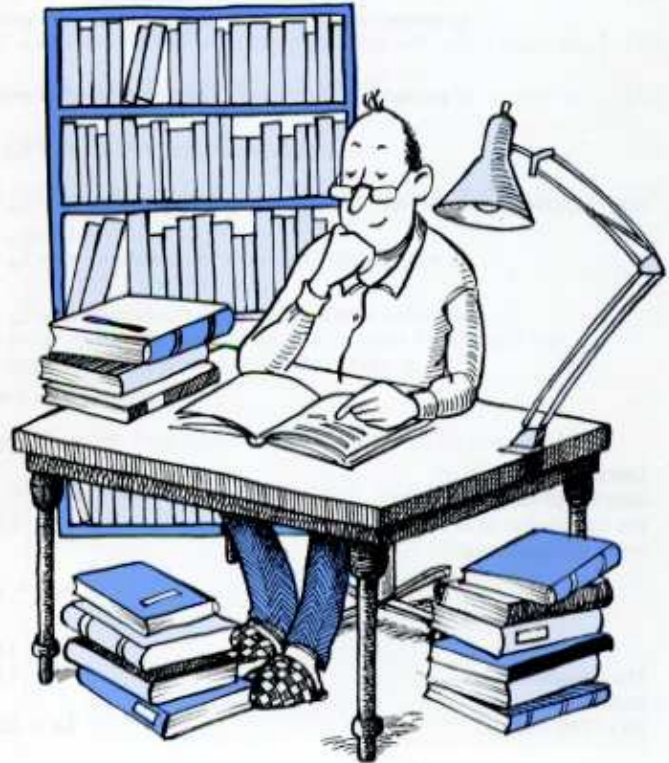
Il calcolo del PMV deve essere fatto considerando appropriati valori di energia metabolica e resistenza termica dell'abbigliamento.



LETTURE DI APPROFONDIMENTO

- 1) P.O. Fanger, *Thermal Comfort*, McGraw-Hill Book Company, 1972
- 2) ISO 7730, *Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and specifications of the conditions for thermal comfort*, 1995.¹
- 3) ISO 7726, *Thermal Environment - Instruments and method for measuring physical quantities*, 1985.¹
- 4) ISO/DIS 13731, *Ergonomics of the Thermal Environment - Definition and units*, February 1996.¹
- 5) ISO 8996, *Ergonomics - Determination of Metabolic Heat Production*, 1990.¹
- 6) ISO 9920, *Ergonomics of the Thermal Environment - Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble*, 1995.¹
- 7) ASHRAE handbook *Fundamentals*, American Society of Heating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 1993.
- 8) B. W. Olesen, *Thermal Comfort Requirement for Floors Occupied by People with Bare Feet*, ASHRAE Trans., Vol. 83 Part 2, 1977.
- 9) E. A. McCullough, B. W. Olesen and S. Hong, *Thermal Insulation Provided by Chairs*, ASHRAE Transactions, 1994.
- 10) P. O. Fanger, A. K. Melikov, H. Hanzawa and J. Ring, *Air Turbulence and Sensation of Draught*. *Energy and Building* 12 (1988) 21-39, Elsevier Amsterdam, 1988.
- 11) D. A. McIntyre, *Indoor Climate*, Applied Science publishers LTD, London, 1980.
- 12) T. H. Benzinger, *The Physiological Basis for Thermal Comfort*, *Proceedings of the First International Indoor Climate Symposium*, Danish Building Research Institute, Copenhagen, 1979.

¹ International Organization for Standardization, Geneva.



APPENDICE A: CALCOLO DELLA POTENZA TERMICA DISPERSA PER IRRAGGIAMENTO E CONVEZIONE (POTENZA TERMICA SECCA)

La potenza termica secca è data dall'equazione:

$$H = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (A_r/A_{Dw}) \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (1a)$$

oppure, in funzione della temperatura operativa:

$$H = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (A_r/A_{Dw}) \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl}+273)^4 - (t_o+273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_o) \quad (1b)$$

o, in funzione della temperatura equivalente:

$$H = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (A_r/A_{Dw}) \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl}+273)^4 - (t_{eq}+273)^4] + f_{cl} \cdot h_{c,eq} \cdot (t_{cl} - t_{eq}) \quad (1c)$$

un'altra equazione per determinare H è:

$$H = K_{cl} = \overline{(t_{sk} - t_{cl})} / I_{cl} \quad (2)$$

dalle equazioni 1 e 2 si può essere ricavare la temperatura superficiale del soggetto vestito (t_{cl}):

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl} \cdot k_1 \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] - I_{cl} \cdot f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (3a)$$

oppure in funzione della temperatura operativa:

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl} \cdot k_1 \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl}+273)^4 - (t_o+273)^4] - I_{cl} \cdot f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_o) \quad (3b)$$

o, in funzione della temperatura equivalente:

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl} \cdot k_1 \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl}+273)^4 - (t_{eq}+273)^4] - I_{cl} \cdot f_{cl} \cdot h_{c,eq} \cdot (t_{cl} - t_{eq}) \quad (3c)$$

con:

$$k_1 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (A_r/A_{Dw}) = 39.6 \cdot 10^{-9} \quad (4)$$

Il calcolo di t_{cl} è iterativo

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{per } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}} & \text{per } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \leq 12.1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (5a)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_o)^{0.25} & \text{per } 2.38(t_{cl} - t_o)^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}} & \text{per } 2.38(t_{cl} - t_o)^{0.25} \leq 12.1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (5b)$$

$$h_{c,eq} = 2.38(t_{cl} - t_{eq})^{0.25} \quad (5c)$$

L'equazione è in accordo con la norma UNI EN ISO 7730 (rif. bibl. 2)

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.29 \cdot I_{cl} & \text{per } I_{cl} < 0.078 \text{ m}^2\text{C/W} \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} & \text{per } I_{cl} \geq 0.078 \text{ m}^2\text{C/W} \end{cases} \quad (6)$$

$$\overline{(t_{sk} - t_{cl})} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) \quad (7)$$

APPENDICE B: EQUAZIONI DI BILANCIO DI ENERGIA, DEL COMFORT E DEL PMV

Equazione di bilancio di energia per il corpo: $M - W = H + E + C_{res} + E_{res}$ (8)

Equazione del comfort termico: $M - W = H + E_c + C_{res} + E_{res}$ (9)

Equazione per la determinazione del PMV: $PMV = (0.303 * e^{0.036 * M} + 0.028) * [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}]$ (10)

Equazione per la determinazione del PPD: $PPD = 100 - 95 * e^{-(0.03353 * PMV^4 + 0.2179 * PMV^2)}$ (11)

Procedura per il calcolo dei parametri nelle equazioni precedenti:

$$E = 3.05 * 10^{-3} * (256 * \bar{t}_{sk} - 3373 - p_a) + E_{sw}$$
 (12)

$$E_c = 3.05 * 10^{-3} * [5733 - 6.99 * (M - W) - p_a] + 0.42 * (M - W - 58.15)$$
 (13)

$$C_{res} = 0.0014 * M * (34 - t_a)$$
 (14)

$$E_{res} = 1.72 * 10^{-5} * M * (5867 - p_a)$$
 (15)

H può essere sia misurato direttamente utilizzando un trasduttore di potenza termica secca che calcolato dall'equazione riportata in Appendice A.

Nell'equazione di bilancio di energia E_{sw} e t_{sk} devono essere misurati.

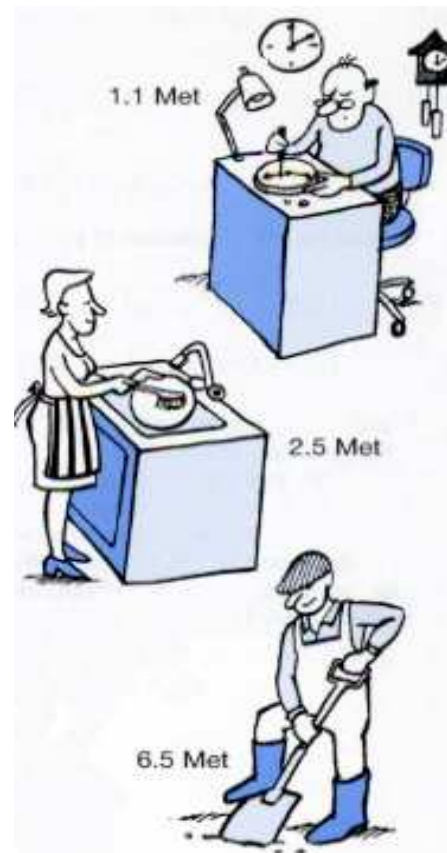
Nella maggior parte dei casi il lavoro esterno \bar{W} può essere posto uguale a zero.

Tutte le equazioni sono in accordo con la teoria di Fanger (rif. bibliografico 1) e con la norma UNI EN ISO 7730 (rif. bibliografico 2).

Nelle equazioni del comfort e del PMV la risposta fisiologica del sistema di termoregolazione è stata correlata statisticamente alla sensazione termica di più di 1300 soggetti testati.

APPENDICE C: TABELLA DEI VALORI MET

Attività	Energia Metabolica	
Stare distesi e riposati	46 W/m ²	0,8 (met)
Stare seduti e rilassati	58 W/m ²	1,0 (met)
Riparare orologi	65 W/m ²	1,1 (met)
Stare in piedi rilassati	70 W/m ²	1,2 (met)
Attività sedentaria (ufficio, scuola, laboratorio)	70 W/m ²	1,2 (met)
Guidare un'auto	80 W/m ²	1,4 (met)
Grafico – Rilegatore	85 W/m ²	1,5 (met)
Stare in piedi, esercitando un'attività leggera (shopping, laboratorio, industria leggera)	93 W/m ²	1,6 (met)
Insegnamento	95 W/m ²	1,6 (met)
Lavoro domestico – Tagliarsi la barba, lavarsi e vestirsi	100 W/m ²	1,7 (met)
Camminare in piano, 2 km/h	110 W/m ²	1,9 (met)
Stare in piedi, attività media (commesso, lavoro domestico)	116 W/m ²	2,0 (met)
Industria di costruzioni – disposizione di mattoni (blocchi di 15,3 kg)	125 W/m ²	2,2 (met)
Stare in piedi lavando i piatti	145 W/m ²	2,5 (met)
Lavoro domestico – Raccogliere foglie dal suolo	170 W/m ²	2,9 (met)
Lavoro domestico – lavare a mano e stirare (120-220W/m ²)	170 W/m ²	2,9 (met)
Industria siderurgica – Rifinire con un martello pneumatico	175 W/m ²	3,0 (met)
Industria edile – Colare il calcestruzzo	180 W/m ²	3,1 (met)
Camminare in piano, 5 km/h	200 W/m ²	3,4 (met)
Attività forestale – Segare controfilo con una sega azionata da un uomo	205 W/m ²	3,5 (met)
Agricoltura – arare con i cavalli	235 W/m ²	4,0 (met)
Industria di costruzione – caricare la carriola con pietre e calce	275 W/m ²	4,7 (met)
Sport – Pattinaggio	360 W/m ²	6,2 (met)
Agricoltura – Scavare con una vanga (24 colpi al minuto)	380 W/m ²	6,5 (met)
Sport – Sciare in piano	405 W/m ²	7,0 (met)
Attività forestale – Lavorare con l'ascia (2 kg, 33 colpi/minuto)	500 W/m ²	8,6 (met)
Sport – Corsa, 15 km/h	550 W/m ²	9,5 (met)

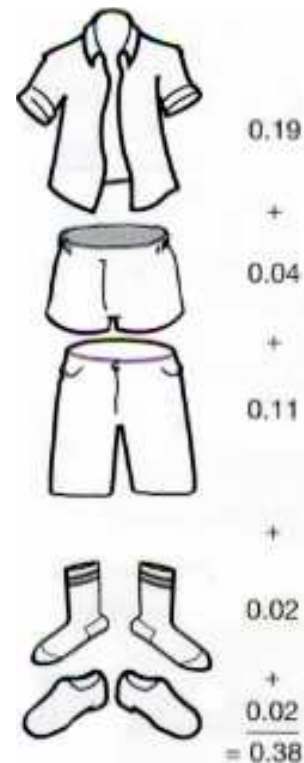


APPENDICE D: TABELLA DEI VALORI DI CLO

Descrizione degli indumenti		$I_{clu}(clo)$	$I_{clum}^{20C/W}$
Biancheria, parte inferiore del corpo	Calze	0,02	0,003
	Slip	0,03	0,005
	Boxer	0,04	0,006
	Mutande di lana lunghe fino al ginocchio	0,06	0,009
	Mutande fino alle caviglie	0,10	0,016
Biancheria, parte superiore del corpo	Reggiseno	0,01	0,002
	Maglietta senza maniche	0,06	0,009
	T-shirt	0,09	0,014
	Maglietta a maniche lunghe	0,12	0,019
	Sottoveste di nylon	0,14	0,022
Camice-Bluse	Top	0,06	0,009
	Blusa a maniche corte	0,09	0,029
	Blusa leggera a maniche lunghe	0,15	0,023
	Camicia leggera a maniche lunghe	0,20	0,031
	Camicia normale a maniche lunghe	0,25	0,039
	Camicia di flanella a maniche lunghe	0,30	0,047
Pantaloni	Blusa a maniche lunghe a collo alto	0,34	0,053
	Pantaloni corti	0,06	0,009
	Pantaloncini da passeggio	0,11	0,017
	Pantaloni leggeri	0,20	0,031
	Pantaloni normali	0,25	0,039
	Pantaloni di flanella	0,28	0,043
Tute	Tuta	0,28	0,043
	Tuta giornaliera con cintura	0,49	0,076
Tute da lavoro	Tuta da lavoro	0,50	0,078
	Tuta a più componenti	1,03	0,160
Tute altamente isolanti	Tuta in "Fiber pelt"	1,13	0,175
	Gilet	0,12	0,019
Maglioni	Maglione leggero	0,20	0,031
	Maglione a maniche lunghe, leggero, con collo alto	0,26	0,040
	Maglione classico	0,28	0,043
	Maglione pesante	0,35	0,054
	Maglione pesante a collo alto	0,37	0,057
Descrizione degli indumenti		$I_{clu}(clo)$	$I_{clum}^{20C/W}$

L'isolamento totale del vestito è dato da :

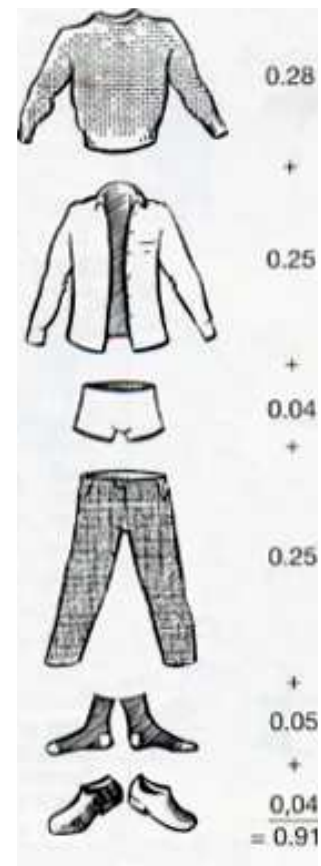
$$I_{cl} = \Sigma I_{clu}$$



Giacche	Panciotto	0,13	0,020
	Giacca leggera estiva	0,25	0,039
	Giacca	0,35	0,054
	Camice	0,30	0,047
Abbigliamento per esterno	Cappotto	0,60	0,093
	Sotto-giacca	0,55	0,085
	Parka	0,70	0,109
	Spolverino in più parti	0,52	0,081
Vari	Calzini	0,02	0,003
	Calzini sottili alla caviglia	0,05	0,008
	Calzini sottili lunghi	0,10	0,016
	Calze di nylon	0,03	0,005
	Scarpe (suola sottile)	0,02	0,003
	Scarpe (suola spessa)	0,04	0,006
	Stivali	0,10	0,016
	Guanti	0,05	0,008
Gonne, abiti	Minigonna, 15 cm sopra il ginocchio	0,10	0,016
	Gonna leggera, 15 cm sotto il ginocchio	0,18	0,028
	Gonna pesante (invernale)	0,25	0,039
	Abito leggero, senza maniche	0,25	0,039
Vestiti da notte	Abito invernale, maniche lunghe	0,40	0,062
	Vestaglia lunga	0,30	0,047
	Vestaglia leggera con cintura	0,15	0,023
	Vestaglia d'ospedale	0,31	0,048
	Pigiama a maniche lunghe	0,50	0,078
	Pigiama che copre i piedi	0,72	0,112
Toga	Mutande da notte	0,10	0,016
	A maniche lunghe, con mantello, lunga	0,53	0,082
Sedie	A maniche lunghe, con mantello, corta	0,41	0,064
	Di legno o di metallo	0,00	0,000
	Rivestita, con cuscino, girevole	0,10	0,016
	Poltrona	0,20	0,032

L'isolamento totale del vestito è dato da :

$$I_{cl} = \Sigma I_{cl}$$



APPENDICE E: CALCOLO DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

L'equazione per il calcolo della temperatura media radiante a partire dalla temperatura dell'aria e da quella di globo è:

$$\bar{t}_r = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + \frac{h_{cg}}{h_r} * (t_g - t_a)} - 273$$

La seguente equazione può essere usata per il calcolo della conduttanza termica per irraggiamento: $h_r = \epsilon * \sigma = 0.95 * 5.67 * 10^{-8} = 5.38 * 10^{-8}$

Per un globo (da rif. bibliografico 3)	$h_{cg} = \text{il maggiore tra}$	$\left\{ \begin{array}{l} 6.3 * [(v_a^{0.6}) / (D^{0.4})] \\ 1.4 * [(t_g - t_a) / D]^{0.25} \end{array} \right.$	Convezione forzata
			Convezione libera

Per un trasduttore di temperatura operativa ¹	$h_{cg} = \text{il maggiore tra}$	$\left\{ \begin{array}{l} 18 * v_a^{0.55} \\ 3 * (t_g - t_a)^{0.25} \end{array} \right.$	Convezione forzata
			Convezione libera

1) Un sensore di forma ellissoidale lungo 160 mm e con il diametro di 54 mm.

Calcolo della temperatura media radiante a partire dal valore misurato della temperatura piana radiante

La temperatura media radiante può essere calcolata con buona accuratezza da sei valori misurati di temperatura piana radiante.

Per una persona seduta l'equazione è:

$$\bar{t}_r = \left\{ \frac{0.18 * [t_{pr}(\text{sopra}) + t_{pr}(\text{sotto})] + 0.22 * [t_{pr}(\text{destra}) + t_{pr}(\text{sinistra})] + 0.30 [t_{pr}(\text{davanti}) + t_{pr}(\text{dietro})]}{2 * (0.18 + 0.22 + 0.30)} \right\}$$

Per una persona in piedi l'equazione è:

$$\bar{t}_r = \left\{ \frac{0.08 * [t_{pr}(\text{sopra}) + t_{pr}(\text{sotto})] + 0.23 * [t_{pr}(\text{destra}) + t_{pr}(\text{sinistra})] + 0.35 [t_{pr}(\text{davanti}) + t_{pr}(\text{dietro})]}{2 * (0.08 + 0.23 + 0.35)} \right\}$$

APPENDICE F: CALCOLO DELLA TEMPERATURA PIANA RADIANTE E DELLA TEMPERATURA OPERATIVA

L'equazione seguente può essere utilizzata per calcolare la temperatura piana radiante:

$$t_{pr} = \sqrt[4]{\sum_1^n F_{pl-i} * (t_i + 273)^4} - 273$$

con t_i = temperatura della superficie i

F_{pl-i} = fattore di vista fra un elementino piano e la superficie i -esima.

$$\sum F_{pl-i} = 1$$

$$F_{pl-2} = \frac{1}{2\pi} * \left[\frac{x}{\sqrt{1+x^2}} * \tan^{-1}\left(\frac{y}{\sqrt{1+x^2}}\right) + \frac{y}{\sqrt{1+y^2}} * \tan^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{1+y^2}}\right) \right]$$

$$F_{pl-3} = \frac{1}{2\pi} * \left[\tan^{-1}\left(\frac{1}{y}\right) - \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} * \tan^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \right]$$

Calcolo della temperatura operativa

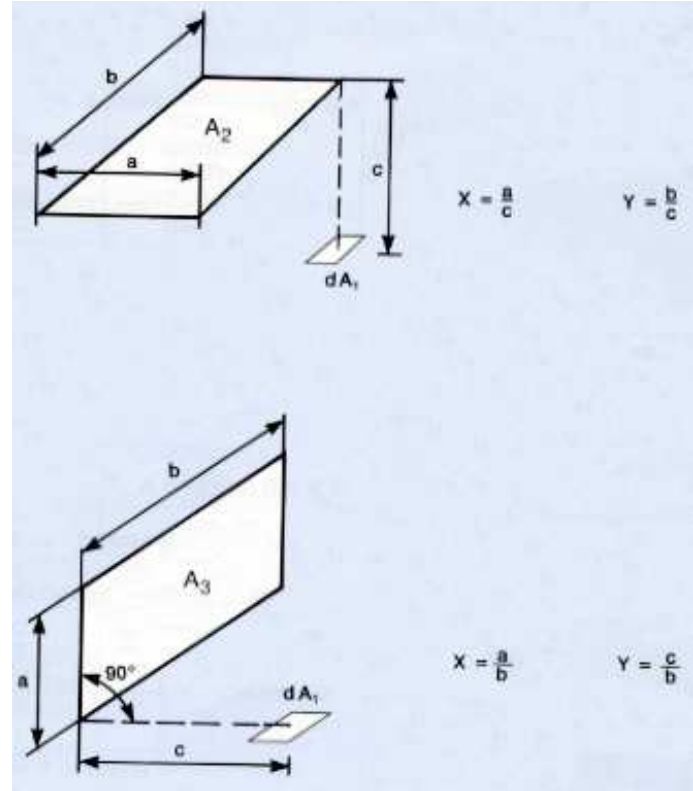
Utilizzando la seguente equazione semplificata si ottiene un valore ragionevolmente accurato:

$$t_o = A_s t_a + (1-A_s) * T_r$$

con:

v_{ar}	<0.2	0.2 - 0.6	0.6 - 1.0
A	0.5	0.6	0.7

L'equazione è tratta dalla norma UNI-EN-ISO 7730.



SIMBOLOGIA

a Larghezza di una superficie rettangolare
 A_{Du} Area della superficie del corpo umano nudo ricavata dalla formula di DuBois.
 A_i Area di una superficie piana.
 A_r Area efficace radiante di un corpo umano; rappresenta la superficie di scambio radiativo attraverso un angolo solido di 4π ed è minore della superficie reale del corpo umano perchè il corpo umano non è una superficie convessa.
 b Lunghezza di una superficie rettangolare.
 c Distanza fra due superfici.
 C_{res} Scambio termico convettivo nella respirazione.
 D Diametro del globotermometro.
 DR Rischio da corrente d'aria; rappresenta la percentuale di persone insoddisfatte a causa della corrente d'aria.
 E Scambio termico evaporativo attraverso la pelle.
 E_c Scambio termico evaporativo attraverso la pelle in condizioni di neutralità termica.
 E_{res} Scambio termico evaporativo nella respirazione.
 E_{sw} Scambio termico evaporativo nella sudorazione.
 ET^* Nuova temperatura efficace.
 f_{cl} Coefficiente di area dell'abbigliamento; è dato dal rapporto fra l'area della superficie del corpo umano vestito e l'area della superficie del corpo umano nudo.

F_{p-i} Fattore di vista fra una persona e la superficie i -esima; è definito come la percentuale di energia radiante emessa dalla superficie corporea che incide direttamente sulla superficie i -esima.
 F_{p-l-i} Fattore di vista fra un elementino piano e la superficie i -esima; è definito come la percentuale di energia radiante emessa dall'elementino che incide direttamente sulla superficie i -esima.
 h_c Conduttanza termica convettiva.
 $h_{c,eq}$ Conduttanza termica convettiva quando la velocità dell'aria nell'ambiente è pari a zero.
 h_{cg} Conduttanza termica convettiva per un globo (ellissoide).
 h_r Conduttanza termica radiativa.
 H Perdita di calore secco o potenza termica dispersa per irraggiamento e convezione (Dry Heat Loss).
 I_{cl} Resistenza termica dell'abbigliamento. E' una resistenza equivalente che tiene conto anche delle parti scoperte del corpo.
 I_{clu} Resistenza termica del singolo capo di abbigliamento.
 K_{cl} Scambio termico conduttivo attraverso i vestiti.
 M Metabolismo energetico; rappresenta la velocità di trasformazione dell'energia chimica in energia termica e lavoro meccanico per mezzo delle attività aerobiche ed anaerobiche del corpo.
 p_a Pressione parziale del vapor d'acqua nell'aria.
 p'_a Umidità nell'ambiente fittizio.
 PMV Voto Medio Previsto (voto medio previsto di un gruppo di persone sulla base della scala delle sensazioni termiche a 7 punti).

PPD Percentuale prevista di insoddisfatti (percentuale prevista di un gruppo di persone che sentono o troppo freddo o troppo caldo).

q Scambio termico fra il corpo e l'ambiente circostante.

q' Scambio termico fra il corpo e l'ambiente circostante nell'ambiente fittizio.

R Scambio termico per irraggiamento.

R' Scambio termico per irraggiamento nell'ambiente fittizio.

RH Umidità relativa.

SD Deviazione standard della velocità dell'aria.

t_a Temperatura dell'aria.

t'_a Temperatura dell'aria nell'ambiente fittizio.

t_{co} Temperatura di comfort termico. La temperatura equivalente alla quale una persona prova una sensazione termica di neutralità.

t_{cl} Temperatura superficiale del soggetto vestito.

t_{eq} Temperatura equivalente.

t_g Temperatura di globo.

t_i Temperatura della superficie i-esima.

t_o Temperatura operativa.

\bar{t}_r Temperatura media radiante.

\bar{t}'_r Temperatura media radiante nell'ambiente fittizio.

t_{pr} Temperatura piana radiante.

Δt_{pr} Asimmetria media radiante.

\bar{t}_{sk} Temperatura media della pelle.

T_u Intensità di turbolenza.

v_a Velocità media locale dell'aria.

v'_a Velocità media locale dell'aria nell'ambiente fittizio.

v_{ar} Velocità media relativa dell'aria.

W Potenza meccanica efficace.

\mathcal{E} Emissività della superficie del corpo.

σ Costante di Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$).

Confidiamo che questo libretto possa risultare un'utile introduzione al comfort termico ed ai metodi per valutarlo.

Se avete delle domande sulla strumentazione da utilizzare o su alcune particolari applicazioni degli strumenti contattateci direttamente alla nostra sede di Padova.





**Airnova S.r.l. – Via San Marco, 127 –
35129 Padova – Tel. +39 049 8934184 –
Fax +39 049 725659 – www.airnova.it –
airnova@airnova.it**