

ELEMENTI DI BIOENERGETICA

IL COMFORT TERMICO

Sommario

In questa lezione saranno descritte le ricerche condotte sul comfort termico dell'essere umano.

Si illustreranno i parametri che influenzano il comfort termico ambientale di un individuo e come questi si combinano nell'equazione trovata dal professore Fanger.

Saranno poi descritti gli indici PMV e PPD che quantificano il grado di disagio termico di un ambiente, in cui non possono essere ottenute le condizioni termiche ideali.

Per dare concretezza alle espressioni teoriche saranno presentati alcuni esempi che illustrano l'applicazione pratica di questa equazione.

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Il comfort termico

Il comfort termico di un essere umano è risaputo non dipendere esclusivamente dalla temperatura dell'aria, ma anche da altri cinque parametri che sono:

- la temperatura media radiante;
- la velocità relativa dell'aria;
- l'umidità relativa dell'aria;
- l'attività fisica svolta all'interno del locale;
- la resistenza termica dei vestiti indossati.

Le reciproche influenze di tutti questi parametri erano sconosciuti prima della scoperta della relazione di comfort termico del Prof. Fanger. Quando una combinazione qualsiasi dei parametri citati soddisfa questa equazione, il comfort termico della maggiore parte degli individui può considerarsi **NEUTRO**.

In pratica non è sempre possibile (tecnicamente o economicamente) arrivare alla neutralità termica di tutti gli individui e, in questo caso, il grado di discomfort rappresenta la migliore stima quantitativa. A tal fine è stato proposto l'indice **PMV** (Voto Medio Previsto) sulla base di esperienze realizzate su un gruppo di soggetti. A questo indice è stato possibile correlare un altro indice che ci permette di calcolare la Percentuale Prevista degli insoddisfatti il **PPD**.

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Sistema di termoregolazione

Il corpo umano ha una temperatura interna approssimativamente costante di 37°C e non è influenzata da, seppur grandi, variazioni della temperatura ambientale.

La temperatura interna del corpo può essere mantenuta costante solo se esiste un equilibrio tra il calore generato internamente e quello assorbito dall'ambiente circostante. Nei mammiferi a sangue caldo, l'equilibrio termico è mantenuto essenzialmente da un organo chiamato IPOTALAMO, che è fisicamente comparabile ad un termostato.

L'equilibrio termico è mantenuto a partire dalle informazioni, relative alla temperatura corporea ricevute ai centri sensoriali del cervello. I ricettori termici sono presenti sia nel centro di controllo della temperatura del cervello che in altri punti del corpo a livello epidermico. Esistono ricettori sensibili sia al caldo che al freddo. Quando la temperatura, e soprattutto le sue variazioni, interessano questi ricettori vengono trasmessi al cervello degli impulsi nervosi. L'informazione viene allora trattata dando luogo a delle reazioni per mantenere costante la temperatura corporea interna.

I ricettori sensibili al freddo cominciano a funzionare se la temperatura cutanea decresce con una velocità superiore a 0,004 °C/s (14,4 °C/ora); quelli sensibili al caldo invece, cominciano a funzionare se la temperatura cutanea cresce più velocemente di 0,001 °C/s (3,6 °C/ora).

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Sistema di termoregolazione

La produzione di calore interna del corpo umano è costante ed è dovuta al metabolismo che converte in calore l'energia chimica. Questa produzione - chiamato metabolismo basale - è dell'ordine di 1 W/kg di peso corporeo per soggetti a riposo in determinate condizioni (a digiuno da 8 ore e sdraiati a riposo in un ambiente con temperatura neutra).

Gli ambienti freddi inducono, per azione cerebrale, a delle contrazioni muscolari che iniziano il processo metabolico e aumentano la produzione di calore. Nei medesimi ambienti freddi le tensioni muscolari generano tremori in grado di aumentare fino a tre volte la produzione di calore del metabolismo basale. La più grande produzione di calore si ha tuttavia con il lavoro muscolare, che può aumentare fino a 10 volte la produzione di calore del metabolismo di base.

Il trasporto di calore dall'interno fino alla superficie cutanea è effettuato attraverso i tessuti e la circolazione sanguigna.

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Equilibrio
termico

La temperatura del nocciolo interno rimane costante, a condizione che ci sia bilanciamento tra la produzione e la perdita di calore. In altri termini dovremo avere l'equilibrio termico:

$$S = M \pm W \pm R \pm C \pm K - E - RES$$

dove: $S =$ immagazzinamento di calore (W/m^2)

$M =$ metabolismo

$W =$ lavoro esterno

$R =$ scambio termico per radiazione

$C =$ scambio termico per convezione

$K =$ scambio termico per conduzione

$E =$ flusso termico per evaporazione cutanea (W/m^2)

$RES =$ scambio termico per respirazione

L'equilibrio termico si ottiene se l'immagazzinamento $S = 0$.

I doppi segni indicano che il parametro può essere positivo o negativo, a seconda di guadagno o perdita di calore.

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Metabolismo, M

L'energia generata all'interno del corpo umano proviene da processi di ossidazione ed equivale al bisogno energetico funzionale. Il valore di (M) può variare da 45 W/m^2 della superficie cutanea (0,8 met), per le situazioni di riposo, fino a più di 500 W/m^2 (9 met) nel caso di una corsa.

La superficie cutanea di una persona è mediamente di $1,8 \text{ m}^2$.

Il metabolismo di una persona viene spesso misurato in "met" dove l'unità di 1 met corrisponde al metabolismo di una persona seduta a riposo.

1 met è uguale a 58 W/m^2

ATTIVITÀ	met	W/m ²
Sdraiato, a riposo	0,8	47
Seduto, a riposo	1,0	58
Attività sedentaria		
(ufficio, abitazione, laboratorio, scuola)	1,2	70
In piedi, a riposo	1,2	70
Attività leggera, in piedi		
(spesa, laboratorio, industria leggera)	1,6	93
Attività media, in piedi		
(vendita, lavoro domestico, lavoro su macchinari)	2,0	117
Attività sostenuta		
(lavoro pesante su macchinari, garage)	3,0	175

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Lavoro
esterno, W

Il lavoro esterno può essere positivo o negativo. Se una persona pedala su una bicicletta da camera molto frenata, deve usare molta energia per mantenere costante la velocità e questa energia è divisa in due parti:

- la prima parte è la quantità necessaria a vincere la resistenza del freno, e noi la indicheremo con W . Questa potenza in questo caso è positiva;
- la seconda parte è, invece, rappresentata dalla produzione interna di calore del corpo necessaria allo stesso per generare un lavoro esterno uguale a W . Quest'ultima è utilizzata per pompare più sangue in circolo ed aumentare la respirazione.

L'uomo è tuttavia una macchina poco efficiente con un rendimento minore del 20%. Se per esempio si aumenta il freno della bicicletta, per avere un corrispondente aumento di 10 W/m^2 di W , il metabolismo aumenterà di 50 W/m^2 . La differenza di 40 W/m^2 deve normalmente essere dissipata con un aumento della temperatura interna del corpo.

Se si scende a piedi una collina e ci si trova in condizioni di dover frenare per non acquistare velocità eccessiva, parte dell'energia potenziale verrà trasformata in calore nei muscoli. Il lavoro esterno in questo caso è negativo.

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Perdita di calore per evaporazione, E

La perdita di calore per evaporazione è dovuta in parte alla diffusione del vapor d'acqua attraverso la pelle (E_d) e parte per evaporazione del sudore sulla superficie cutanea (E_{sw}). Per poter evaporare l'acqua sottrae calore alla pelle.

La quantità d'acqua diffusa attraverso la pelle e la perdita di calore di evaporazione corrispondente sono funzione della differenza tra la pressione di vapore d'acqua saturo alla temperatura cutanea (p_s) e la pressione del vapor d'acqua nell'aria ambientale (p_a).

La perdita di calore per evaporazione per diffusione del vapor d'acqua attraverso la pelle (E_d) si può calcolare con la seguente relazione

$$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} (256 \cdot t_s - 3373 - p_a)$$

dove t_s = temperatura superficie cutanea

p_a = pressione del vapor d'acqua nell'aria ambientale (Pascal).

La diffusione dell'acqua attraverso la pelle genera normalmente una perdita di calore di circa 10 W/m^2 .

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Perdita di
calore per
evaporazione, E

La perdita di calore per diffusione acquosa attraverso la pelle è permanente, e non è controllata dal sistema di termoregolazione dell'essere umano. L'evaporazione sudorifera cutanea (E_{sw}) è uno dei mezzi più efficaci, a disposizione del corpo umano, per evitare l'aumento della temperatura corporea interna, anche in caso di lavoro duro. L'ammontare di questa evaporazione può cambiare considerevolmente in funzione dell'attività svolta in un ambiente caldo e umido.

La sudorazione umana è molto limitata ed esistono considerevoli differenze soggettive. Una sudorazione eccessiva va a provocare una condensazione di una parte del sudore che non è in grado di asportare calore dal corpo. **È solo il sudore che evapora sulla superficie cutanea che è in grado di asportare calore dal corpo.**

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Perdita di calore per respirazione, RES

Respirando si ha una perdita di calore in quanto l'aria che espiriamo è più calda di quella che inspiriamo, e anche perché si ha una differenza nel contenuto acquoso. Lo scambio di calore dovuto alla differenza di temperatura è dato dalla:

$$L = 0,0014 \cdot M (34 - t_a) \quad W / m^2$$

Questa quantità di calore persa è normalmente trascurabile. Una persona che corre ($M = 400 \text{ W/m}^2 - 7 \text{ met}$) in aria con temperatura di -10°C perde 44 W (25 W/m^2).

La perdita di calore dovuta alla differenza di vapore d'acqua tra l'aria inspirata e espirata viene stimata come:

$$E_{res} = 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot M (5867 - p_a) \quad W / m^2$$

dove: p_a = pressione del vapor d'acqua in aria ambiente, Pa.

Per attività interne normali e una temperatura ambientale di circa 20°C , la perdita di calore per espirazione è molto piccola, compresa tra 2 e 5 W/m^2 e può quindi essere trascurata.

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Conduzione termica attraverso i vestiti, K_{cl}

Lo scambio di calore attraverso i vestiti è dato da:

$$K_{cl} = \frac{(t_s - t_{cl})}{0,155 \cdot I_{cl}} \quad W / m^2$$

dove: t_s = temperatura cutanea media, °C
 t_{cl} = temperatura superficiale dei vestiti, °C
 I_{cl} = resistenza termica dei vestiti, clo

In tabella si forniscono i valori della resistenza termica per combinazioni tipiche di abbigliamento. La stima di t_s e t_{cl} sarà invece fatta più avanti.

ABBIGLIAMENTO	clo	I_{cl} (clo) ($10^3 m^2/KW$)
Nudo	0	0
Calzoncini	0,1	15,5
Tenuta tropicale tipo: <i>Slip, calzoncini, camicia a collo aperto e maniche corte, Calze leggere e sandali</i>	0,3	46,5
Tenuta estiva leggera: <i>Slip, pantaloni leggeri, camicia a collo aperto a maniche corte, calze leggere e scarpe</i>	0,5	77,5
Tenuta da lavoro leggera: <i>Sotto abiti leggeri, camicia da lavoro in cotone a maniche lunghe, pantaloni da lavoro, calze in lana e scarpe</i>	0,7	108,5
Tenuta invernali per ambienti chiusi: <i>Sottoabiti, camicia a maniche lunghe, pantaloni, pull-over a maniche lunghe, calze pesanti e scarpe</i>	1,0	155
Tipica tenuta cittadina europea: <i>Suotoabiti in cotone a maniche e gambe lunghe, camicia, vestito completo con pantaloni, giacca e gilet, calze in lana e scarpe invernali</i>	1,5	232,5

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Scambio termico
per radiazione, R

Lo scambio di calore per radiazione nasce tra la superficie della persona (pelle - vestiti) e le superfici circostanti (finestre, muri, radiatori). Questo tipo di scambio è descritto dalla seguente relazione:

$$R = f_{eff} \cdot f_{cl} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] \quad W / m^2$$

dove:

f_{eff} = fattore della effettiva superficie di irraggiamento, cioè il rapporto tra la superficie effettiva di irraggiamento e quella totale del corpo coperto;

f_{cl} = fattore della superficie dei vestiti, cioè il rapporto tra le superfici del corpo vestito e quella del corpo nudo.

ε = potere di emissione della superficie esterna del corpo coperto;

σ = costante di Stefan-Boltzmann: $5,77 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

t_{cl} = temperatura superficiale dei vestiti, °C

\bar{t}_r = temperatura media d'irraggiamento, °C

Poiché in tutte le precedenti relazioni la perdita di calore corporeo è stata data in W/m^2 di superficie cutanea del corpo nudo, è risultato necessario apportare un fattore moltiplicativo di correzione f_{cl} .

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Scambio termico per radiazione, R

Certe parti del vestiario scambiano calore per radiazione non solo con l'ambiente ma anche con altre parti del corpo. La superficie radiante effettiva diventa allora inferiore a quella totale. Questo effetto è compreso nel fattore f_{ett} ottenuto sperimentalmente e vale 0,71.

Il potere di emissione della pelle è molto prossimo a 1 mentre quello dei vestiti è di circa 0,95 così si utilizzerà il valore intermedio di 0,97.

Incorporando le costanti dette, la perdita di calore per irraggiamento diventa:

$$R = 3,95 \cdot 10^{-8} f_{cl} \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] \quad W / m^2$$

Per temperature interne normali (tra 10 e 30°C) questa relazione si può scrivere come lineare:

$$R = 3,9 f_{cl} (t_{cl} - \bar{t}_r) \quad W / m^2$$

Se la temperatura media d'irraggiamento è superiore alla temperatura superficiale di un individuo, si ha guadagno termico per radiazione.

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Scambio termico per convezione, C

La temperatura superficiale di un individuo è normalmente differente da quella dell'aria ambiente. L'aria in prossimità della persona sarà riscaldata e, siccome la densità dell'aria calda è inferiore a quella dell'aria fredda essa salirà verso l'alto e sarà rimpiazzata da aria più fresca. Questo fenomeno è noto come convezione libera.

Se si ha a che fare con aria forzata che investe una persona si dovrà parlare, invece, di convezione forzata.

Lo scambio di calore è dato dalla:

$$C = f_{cl} \cdot h_c (t_{cl} - t_a) \quad W / m^2$$

dove: t_a = temperatura dell'aria, °C

f_{cl} = fattore di abbigliamento

h_c = coefficiente di trasferimento del calore per convezione, W/m² K.

Per convezione libera si ha: $h_c = 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} \quad W / m^2 K$

Per convezione forzata: $h_c = 12,1 \sqrt{v_{ar}} \quad W / m^2 K$

Condizioni di confort termico

Il confort termico è definito come uno stato fisico per cui si esprime soddisfazione per l'ambiente in cui ci si trova, sotto il profilo delle condizioni termiche. La prima condizione necessaria ma non sufficiente da verificare per ottenere il confort termico è che la relazione del bilancio termico sia soddisfatta.

$$M \pm W - E - RES = \pm K_{cl} = \pm R \pm C \quad [1]$$

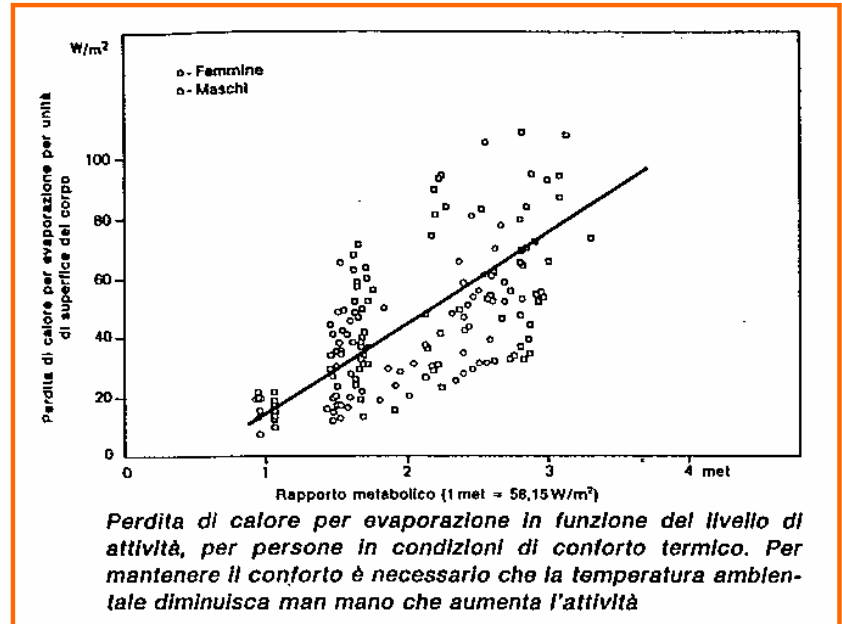
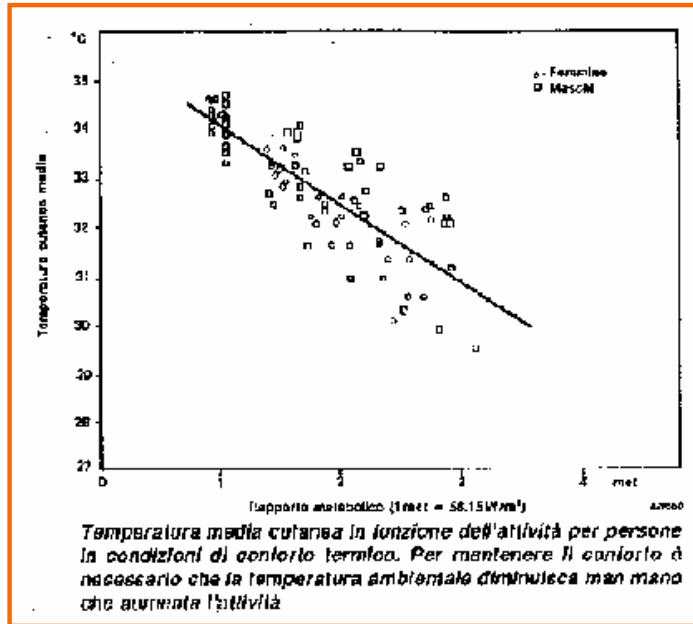
Per un dato livello di attività (M), **la temperatura cutanea media** (t_s) e **la perdita di sudore** (E_{sw}) sono gli unici parametri fisiologici che influenzano l'equilibrio termico. Quindi per un dato individuo che svolge una certa attività, conoscendone l'abbigliamento e l'ambiente ove soggiorna, si può stabilire l'equilibrio termico con una combinazione della temperatura cutanea media e della perdita di sudore.

L'equilibrio termico è tuttavia **insufficiente** a stabilire le condizioni di **confort termico**. Nella grande varietà di condizioni ambientali dove si può ottenere il bilancio termico, esiste solo una piccola fascia dove si può ottenere il confort termico.

Nel corso dell'esperienza con soggetti in condizioni di benessere termico, sono state stabilite delle relazioni tra l'attività e la temperatura cutanea e tra l'attività e la perdita di sudore.

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Condizioni di comfort termico



Da queste figure si può notare l'esistenza di differenze individuali, per cui è stato assunto il valor medio per stabilire l'equazione del comfort termico. Utilizzando una regressione lineare si trovano le seguenti relazioni:

$$t_s = 35,7 - 0,0275(M - W) \quad ^\circ\text{C}$$

$$E_{sw} = 0,42(M - W - 58,15) \quad \text{W} / \text{m}^2$$

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Equazione del benessere termico

Se si incorporano le relazioni per la perdita di calore precedentemente stabilite e le due che danno t_s e E_{sw} nell'uguaglianza [1] si arriva a ricavare l'equazione del confort termico:

$$(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \{5733 - 6,99 (M - W) - p_a\} - 0,42 \{(M - W) - 58,15\} + \\ - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0,0014 M (34 - t_a) = 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \left\{ (t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right\} + \\ - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_a] - \\ 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - \\ 0,0014 M (34 - t_a) \end{array} \right\}$$

$$h_c = \left\{ \begin{array}{ll} 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} & se \quad 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \sqrt{v_{ar}} & se \quad 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_{ar}} \end{array} \right\}$$

$$f_{cl} = \left\{ \begin{array}{ll} 1,00 + 1,29 I_{cl} & se \quad I_{cl} < 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & se \quad I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \end{array} \right\}$$

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Gli indici PMV e PPD

Per ragioni tecniche ed economiche non è sempre possibile realizzare un ambiente in grado di dare il benessere termico ottimale. È allora utile quantificare il grado di sconforto termico, per il quale è stato proposto un indice che fornisce il voto medio prevedibile (PMV) di un gruppo significativo di soggetti, secondo la seguente scala psico-fisiologica:

- +3 Caldo
- +2 Tiepido
- +1 Leggermente tiepido
- 0 Neutro
- 1 Leggermente fresco
- 2 Fresco
- 3 Freddo

Il valore di PMV può essere determinato o con alcune tabelle riportate nella ISO 7730 oppure analiticamente dalla:

$$PMV = \left(0,303 e^{-0,036M} + 0,028\right) \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_a] - \\ 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M(5867 - p_a) - \\ 0,0014M(34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - \\ f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\}$$

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Gli indici PMV e PPD

dove:

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

$$h_c = \left\{ \begin{array}{ll} 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} & \text{se } 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \sqrt{v_{ar}} & \text{se } 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_{ar}} \end{array} \right\}$$

$$f_{cl} = \left\{ \begin{array}{ll} 1,00 + 1,29 I_{cl} & \text{se } I_{cl} < 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{se } I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \end{array} \right\}$$

in cui:

PMV = Voto medio previsto

W = Lavoro esterno

M = Metabolismo

I_{cl} = resistenza termica dei vestiti, clo

f_{cl} = rapporto della superficie del corpo vestito e quella del corpo nudo

t_a = temperatura dell'aria

t_r = temperatura media d'irraggiamento

v_{ar} = velocità relativa dell'aria

p_a = pressione parziale del vapor d'acqua

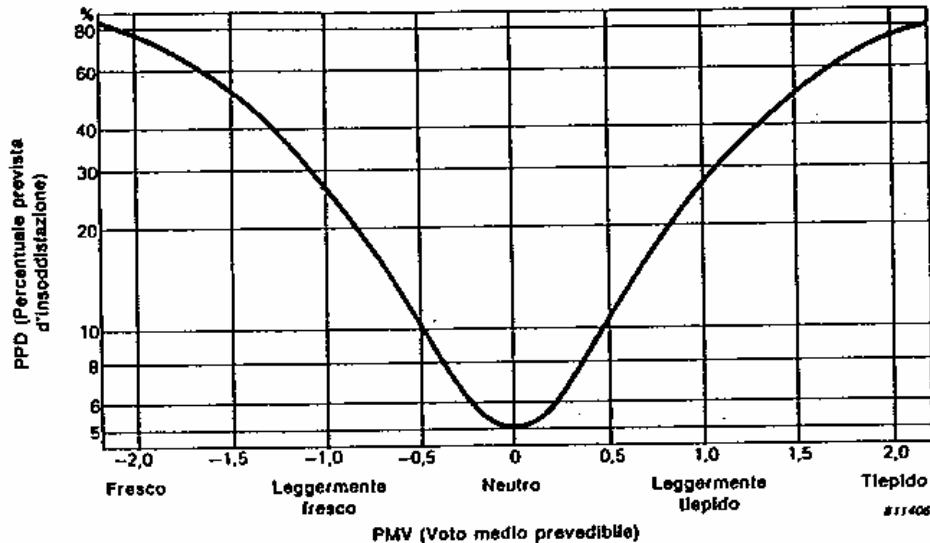
h_c = coefficiente di trasferimento del calore per convezione

t_{cl} = temperatura superficiale dei vestiti

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

Gli indici PMV e PPD

Una volta determinato il PMV dalla figura si potrà determinare la percentuale prevedibile d'insoddisfazione (PPD). Gli indici PMV e PPD sono stati proposti per le norme destinate alla valutazione di ambienti moderati sotto il profilo termico.



Relazione tra gli indici PPD (Percentuale prevedibile d'insoddisfazione) e PMV (Voto medio prevedibile)

In queste norme è stato previsto di raccomandare di restare entro i limiti di:

$$-0,5 < PMV < 0,5$$

$$PPD < 10\%$$

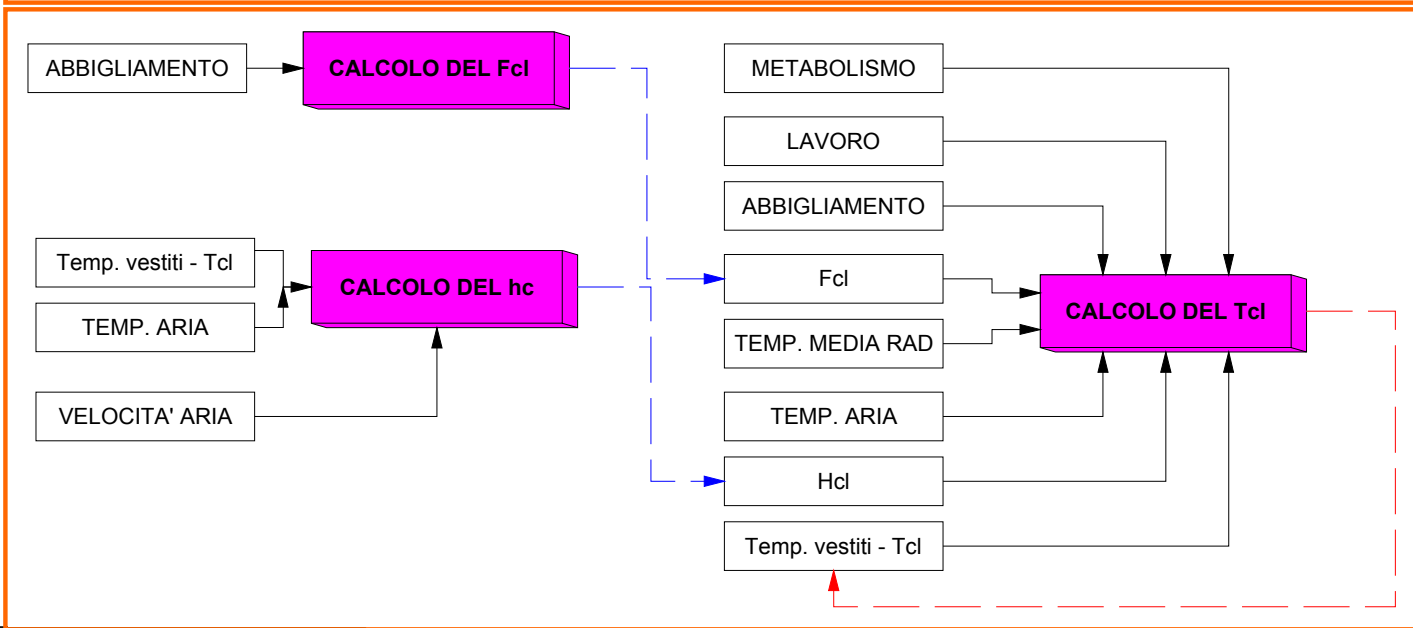
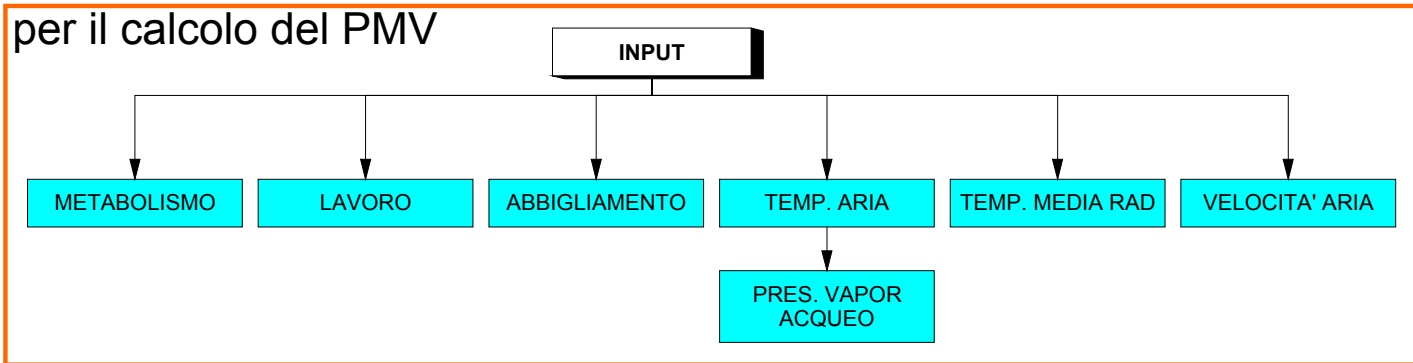
perché un ambiente possa essere accettabile.

$$PPD = 100 - 95 e^{-\left(0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2\right)}$$

FLOW CHART

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

per il calcolo del PMV



FLOW CHART
per il calcolo del PMV

Corso di Componenti e Impianti Termotecnici

