

Corso di

IMPIANTI TECNICI per l'EDILIZIA

**Il Benessere
termo-igrometrico**



Prof. Paolo ZAZZINI
Dipartimento INGEO
Università "G. D'Annunzio" Pescara
www.lft.unich.it

Comfort ambientale:

L'individuo inserito in un ambiente è sottoposto ad una serie di sollecitazioni rispetto alle quali può trovarsi alternativamente in

condizioni di benessere o malessere ambientale.

Comfort ambientale: Condizione mentale di soddisfazione dell'individuo rispetto al microclima dell'ambiente in cui è inserito.

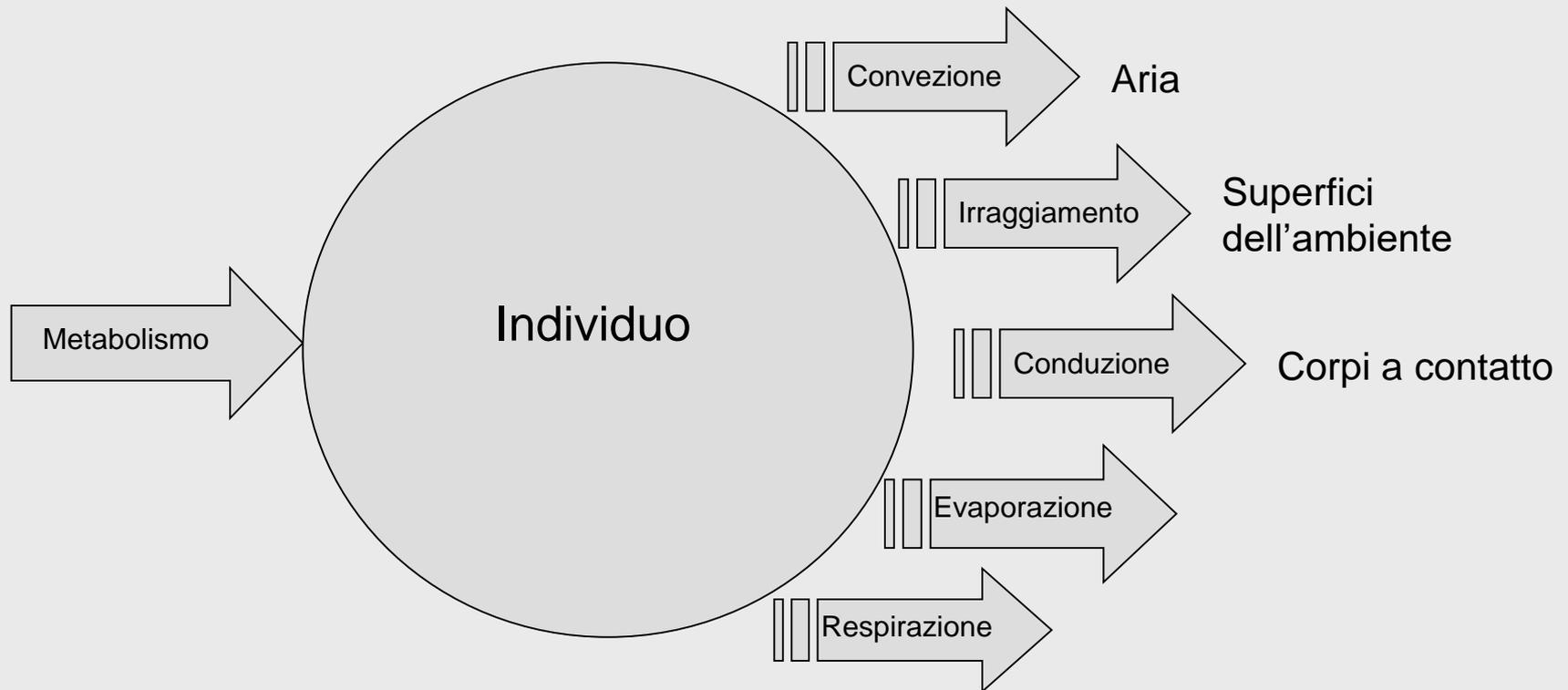
Le condizioni microclimatiche ritenute ottimali non comportano necessariamente uno stato di benessere per la totalità degli individui presenti nell'ambiente: **una certa percentuale** di occupanti si dichiarerà **comunque insoddisfatta.**

La determinazione delle condizioni ambientali più favorevoli per il Benessere Termo-igrometrico viene fatta con **metodi statistici**

Corpo umano: sistema termodinamico dotato di un *generatore interno di calore* in grado di *scambiare energia termica con l'ambiente* circostante.

Condizioni di benessere per il corpo umano: $T_{in} = 37 \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Necessario equilibrio termico con l'ambiente circostante.



Bilancio termico sul sistema termodinamico corpo umano

Condizione necessaria per il benessere termoigrometrico:

OMEOTERMIA

Il Principio della Termodinamica con variazione di energia interna nulla

(Energie riferite all'unità di superficie corporea)

$$M - L - Q_E - Q_{resp} - (Q_R + Q_C + Q_K) = 0 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

In regime stazionario la potenza termica sviluppata all'interno dell'organismo umano grazie all'attività metabolica (digestione dei cibi) uguaglia i disperdimenti di calore verso l'ambiente in cui è inserito.

Relazione di Du Bois per il **calcolo della superficie corporea**

$$S_c = 0,202 \cdot M^{0,425} \cdot h^{0,725}$$

in cui:

S_c : superficie corporea totale dell'individuo (m²)

M: massa dell'individuo (kg)

h: altezza dell'individuo (m)

Superficie effettiva di scambio termico:

$$S_{cl} = S_c \cdot f_{cl}$$

in cui f_{cl} : fattore maggiorativo che tiene conto del vestiario indossato

Abbigliamento	f_{cl}
Pantaloni e camicia a maniche corte	1,15
Pantaloni e camicia a maniche lunghe	1,20
Pantaloni e camicia a maniche lunghe e giacca	1,23
Gonna, camicia a maniche corte, calze e sandali	1,26
Tuta a maniche lunghe e maglietta	1,23
Gonna lunga, calze, camicia a maniche lunghe, giacca	1,46

METABOLISMO M

$$M - L - Q_E - Q_{resp} - (Q_R + Q_C + Q_K) = 0$$

Il flusso metabolico interno è il **calore prodotto** dal corpo umano durante la fase di **digestione dei cibi** assimilati. Varia in funzione dell'**attività svolta**.

Reazioni di combustione delle sostanze chimiche contenute nei cibi:

Produzione interna di calore

Parte dell'energia assunta è immagazzinata nei grassi: riserva che rende l'organismo indipendente da una continua assunzione di cibi.

Per mantenere la temperatura interna costantemente pari al valore ottimale per il benessere termico il calore sviluppato in eccesso deve essere ceduto all'ambiente circostante.

Si può suddividere in due termini:

Flusso metabolico basale: legato allo svolgimento delle attività fisiologiche di base (respirazione, circolazione sanguigna...)

Flusso metabolico per attività: legato ad attività intellettuali e/o fisiche

Il metabolismo è dunque un **indice dell'attività svolta** e si misura con un'unità di misura convenzionale, il **MET**.

$$1 \text{ MET} \cong 58 \text{ W/m}^2$$

Il metabolismo basale si riduce di circa il 30% durante il sonno, attenuandosi in queste condizioni l'intensità di tutti i processi vitali.

Attività	W (*)	met
Soggetto dormiente	73	0.7
Soggetto seduto	104	1.0
Soggetto in piedi rilassato	125	1.2
Scrivere a macchina	115	1.1
Disegnare	125	1.2
Pulizie di casa	209-355	2.0-3.4
Lavare e stirare	209-376	2-3.6
Sollevarre sacchi da 50 Kg	418	4.0
Lavoro di piccone e pala	418-501	4.0-4.8
Cammino in piano a 4 Km/h	250	2.4
Cammino in piano a 8 Km/h	606	5.8
Ginnastica	313-418	3.0-4.0
Tennis	480	4.6
Lotta	908	8.7

(*) Dati riferiti ad un individuo di taglia media con superficie corporea = 1.8 m²

Calcolo del fabbisogno energetico di due individui di uguale superficie corporea (1.8 m²) che svolgano attività diverse:

Individuo 1: IMPIEGATO

Attività lavorativa 1.2 MET per 8 ore

Riposo 1 MET per 8 ore

Sonno 0.7 MET per 8 ore

Individuo 2: OPERAIO

Attività lavorativa 5 MET per 8 ore

Riposo 1 MET per 8 ore

Sonno 0.7 MET per 8 ore

Fabbisogno Energetico

$$\text{IMPIEGATO} \rightarrow (1.2 * 8 + 1 * 8 + 0.7 * 8) * 1.8 * 58 = 2422.1 \text{ W h} = 8719.5 \text{ kJ}$$

$$\text{OPERAIO} \rightarrow (5 * 8 + 1 * 8 + 0.7 * 8) * 1.8 * 58 = 5595.8 \text{ W h} = 20144.9 \text{ kJ}$$

$$M - L - Q_E - Q_{resp} - (Q_R + Q_C + Q_K) = 0$$

L: *lavoro meccanico* compiuto dall'organismo

Lavoro positivo (energia uscente dall'organismo)

Compiuto da un individuo verso l'esterno contrastando una forza (es. sollevare un peso contrastando il campo gravitazionale):

Lavoro negativo (energia entrante nell'organismo)

Subito da un individuo per l'azione di forze esterne (es. abbassare un peso)

Rapportando il lavoro meccanico erogato al dispendio energetico (metabolismo) si ottiene il:

$$\text{Rendimento meccanico} \quad \eta = \frac{L}{M}$$

In genere $\eta \approx 0$ per la maggior parte delle attività negli interni \Rightarrow **L trascurabile**

$$M - L - \cancel{Q_E} - Q_{resp} - (Q_R + Q_C + Q_K) = 0$$

Q_E : *flusso termico ceduto dal corpo umano per evaporazione*

Sottrazione di calore latente dall'organismo per consentire l'**evaporazione del liquido presente sulla pelle**. E' il **meccanismo più efficace** di dispersione del calore

Il liquido è prodotto per:

sudorazione (secrezione delle ghiandole sudoripare):

diffusione dell'acqua contenuta nei vari organi attraverso i tessuti cutanei

Tra i due la **sudorazione** è il meccanismo **più intenso** e dipende dall'attività svolta

La **diffusione** è strettamente legata al **tipo di vestiario** indossato ed alle condizioni termoigrometriche esterne

Resistenza termica degli abiti indossati

La resistenza termica degli abiti si misura in Clo (da clothing: vestiario)

$$1 \text{ Clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ K /W}$$

Tipo di abbigliamento	Clo	m²K/W
Pantaloncini corti	0.1	0.0155
Camicia, pantaloncini, sandali	0.3-0.4	0.0465-0.062
Pantaloni lunghi estivi, camicia	0.5	0.0775
Pantaloni da lavoro, calze di lana e camicia	0.6	0.093
Tenuta da fatica delle Forze Armate	0.7	0.1085
Abito pesante tipo europeo	1.5	0.2325
Divisa invernale delle F.A.	1.5-2.0	0.2325-0.31

1 clo rappresenta la resistenza termica di un abito europeo di mezza stagione

$$M - L - \cancel{Q_E} - Q_{resp} - (Q_R + Q_C + Q_K) = 0$$

Q_E dipende da:

umidità relativa ϕ ;

temperatura dell'aria t_a ;

temperatura di pelle t_{sk} ;

metabolismo M .

Q_E e t_{sk} possono variare per esigenze di termoregolazione del corpo umano, ma, ai fini del benessere, tali variazioni devono essere di entità ridotta.

Attraverso rilevamenti sperimentali si possono stabilire i **valori ottimali** di t_{sk} e Q_E :

$$t_{sk} = 35,7 - 0,0275 \cdot M$$

$$Q_E \cong 0,42 \cdot (M - 58)$$

$$M - L - Q_E - Q_{resp} + (Q_R + Q_C + Q_K) = 0$$

Q_{resp} : *flusso termico ceduto attraverso la respirazione*

E' costituito da **calore latente** (l'aria entrando nel cavo orale si umidifica facendo evaporare acqua presa dalle mucose a spese dell'energia interna dell'individuo) e **calore sensibile** (l'aria entrando nel cavo orale si riscalda a spese di calore ricevuto dall'organismo)

Dipende da:

Umidità relativa ϕ ;

Temperatura dell'aria t_a .

In condizioni normali si tratta di **quantità** di calore **molto piccole**, che diventano **significative** solo per **notevoli differenze** tra la temperatura dell'aria espirata ($\cong 34^\circ\text{C}$) e la temperatura esterna

La **presenza di un individuo** all'interno di un ambiente modifica le condizioni igrometriche dell'ambiente stesso, aumentando il valore di **UMIDITA' RELATIVA** (attraverso **sudorazione, diffusione e respirazione** che comportano cessione da parte dell'organismo del calore necessario per l'evaporazione dell'acqua (**calore latente di vaporizzazione**))

$$M - L - Q_E - Q_{resp} - Q_R + Q_C + Q_K = 0$$

Q_R : flusso termico scambiato per irraggiamento

$$Q_R = h_r \cdot (t_{cl} - t_{mr})$$

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{A}{A_{sk}} \cdot [0,5 \cdot (t_{cl} + t_{mr})]^3 \quad h_r = 4,71 \cdot \varepsilon \quad \text{con: } \left[h_r = \frac{W}{m^2 K} \right]$$

in cui:

t_{mr} : temperatura media radiante

$\frac{A}{A_{sk}}$: frazione di superficie corporea che effettivamente partecipa allo scambio radiativo
(es. 0,696 per una persona seduta, 0,725 per una persona in piedi)

ε : emissività

σ : costante di Stefan - Boltzmann

Q_R dipende da:

temperatura media radiante t_{mr}^*

* *Temperatura superficiale uniforme di una ipotetica superficie nera in grado di scambiare per irraggiamento la stessa quantità di calore effettivamente scambiata dall'ambiente con la superficie cutanea del corpo umano.*

$$M - L - Q_E - Q_{resp} - (Q_R + Q_C + Q_K) = 0$$

Q_C : flusso termico scambiato per *convezione*

$$Q_C = h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

$$h_c = 3,12 \quad \text{per } 0 < v_a < 0,2 \qquad h_c = 8,3 \cdot v_a^{0,6} \quad \text{per } 0,2 < v_a < 4 \quad (\text{correlazioni di Mitchell})$$

$$h_c = 5,1 \quad \text{per } 0 < v_a < 0,15 \qquad h_c = 2,7 + 8,7 \cdot v_a^{0,87} \quad \text{per } 0,15 < v_a < 1,5 \quad (\text{correlazioni di Colin-Houdas})$$

$$h_c = 5,7 \cdot (M - 0,8)^{0,39} \quad \text{per } 1 < M < 3 \qquad (\text{correlazione di Gagge et al.})$$

$$\text{con: } \left[v_a = \frac{m}{s} \right] \quad \left[h_c = \frac{W}{m^2 K} \right] \quad [M = Met]$$

Dipende da:

temperatura dell'aria t_a , velocità dell'aria v_a , metabolismo M

$$M - L - Q_E - Q_{resp} - (Q_R + Q_C + Q_K) = 0$$

Il flusso termico **radiativo** e quello **convettivo** possono essere espressi in un **unico termine** funzione della temperatura di pelle e della resistenza termica degli abiti indossati

$$Q_R = h_r \cdot (t_{cl} - t_{mr})$$

$$Q_C = h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

$$Q_R + Q_C = \frac{(t_{sk} - t_{cl})}{R_{cl}}$$

$$M - L - Q_E - Q_{resp} - (Q_R + Q_C + Q_K) = 0$$

Q_K : flusso termico scambiato per **conduzione**

Q_K di solito è **trascurabile**, per le **piccole dimensioni** di contatto tra la superficie corporea dell'individuo ed altre superfici a contatto (es. pianta dei piedi...)

Equilibrio termico:

condizione **necessaria ma non sufficiente** per il benessere.

Il corpo umano può soddisfare l'equazione di bilancio termico, ma non trovarsi in condizioni di comfort termico, anzi essere nella necessità di attivare i

MECCANISMI DI TERMOREGOLAZIONE

All'innalzarsi della temperatura interna dell'ambiente:

Fenomeni di **vasodilatazione** dei capillari cutanei, **aumento** della circolazione sanguigna periferica e della **temperatura epidermica media** ⇒ Viene **favorita la cessione di calore** dal corpo all'ambiente per **irraggiamento e convezione**.

Se ciò non è sufficiente a mantenere l'omeotermia interna:

sudorazione con perdita di calore per **evaporazione**. L'acqua prodotta sulla cute evaporando sottrae calore alla superficie epidermica.

All'abbassarsi della temperatura interna dell'ambiente:

Fenomeni di **vasocostrizione** dei capillari cutanei, limitazione della circolazione sanguigna periferica e **diminuzione** della **temperatura epidermica media** ⇒ Viene **ridotta la cessione di calore** dal corpo all'ambiente per irraggiamento e convezione.

Se ciò non è sufficiente a mantenere l'omeotermia interna:

fenomeni di **attività motoria** involontaria (**tremori e brividi**) che provocano una intensificazione dell'attività metabolica con conseguente **aumento** della **produzione interna di calore**.

L'analisi dei termini che compongono l'equazione del benessere ha permesso di evidenziare i seguenti

Parametri ambientali che influenzano le condizioni di B. T. I.:

Temperatura dell'aria (°C);

Temperatura media radiante (°C);

Umidità relativa;

Velocità dell'aria (m/s).

Parametri comportamentali che influenzano le condizioni di B. T. I.:

Attività svolta \Rightarrow metabolismo

Resistenza termica degli abiti indossati.

Temperatura dell'aria

*Il solo controllo della temperatura dell'aria **non garantisce il benessere.** Di solito solo il 60-65 % degli occupanti si ritiene pienamente soddisfatto in ambienti in cui viene controllata solo la temperatura dell'aria*

Valori raccomandati di temperatura dell'aria (UNI 10339):

$$t_a \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{in regime invernale}$$

$$t_a \geq 26 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{in regime estivo}$$

Umidità relativa

Valori troppo bassi comportano **secchezza** delle **muco**se dell'apparato respiratorio e della pelle

Valori troppo alti comportano **problemi igienici** (fenomeni di condensa con conseguente formazione di muffe)

Valori raccomandati di umidità relativa (UNI 10339):

$35 \% \leq \varphi \leq 50 \%$ in regime invernale

$45 \% \leq \varphi \leq 60 \%$ in regime estivo

Velocità dell'aria

Influisce in modo sensibile sugli scambi convettivi tra individuo e ambiente e può provocare **sensazioni di fastidio locale** soprattutto ad individui dediti ad attività sedentarie se assume valori elevati tali da dar luogo alla **formazione di correnti**

Valori accettabili compresi tra 0,15 e 0,30 m/s.

In regime estivo sono sopportabili valori più elevati

Valori raccomandati dalla Norma (UNI10339):

$v_a = 0,15 \text{ m/s}$ Condizioni standard

$v_a = 0,05 \text{ m/s}$ Camere sterili

$v_a = 0,40 \text{ m/s}$ Cucine nei ristoranti

Esplicitando **l'equazione di bilancio termico** in funzione delle grandezze da cui dipendono i vari termini che compaiono in essa si ottiene:

$$f(M, R_{cl}, t_{mr}, t_a, v_a, \varphi) = 0$$

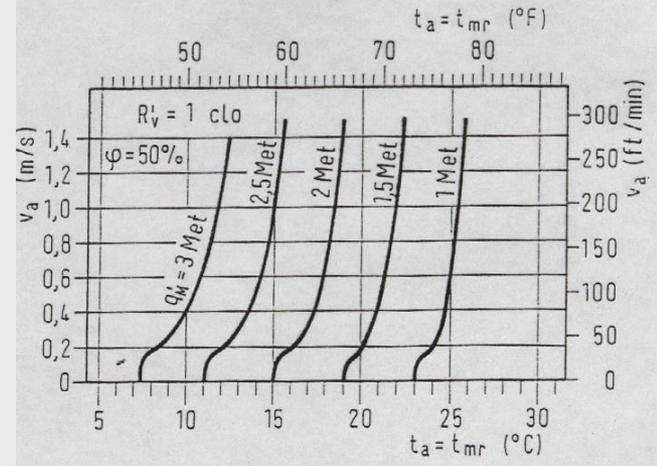
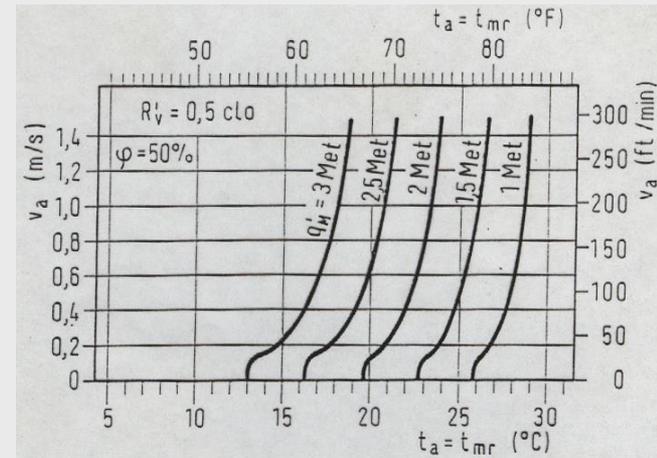
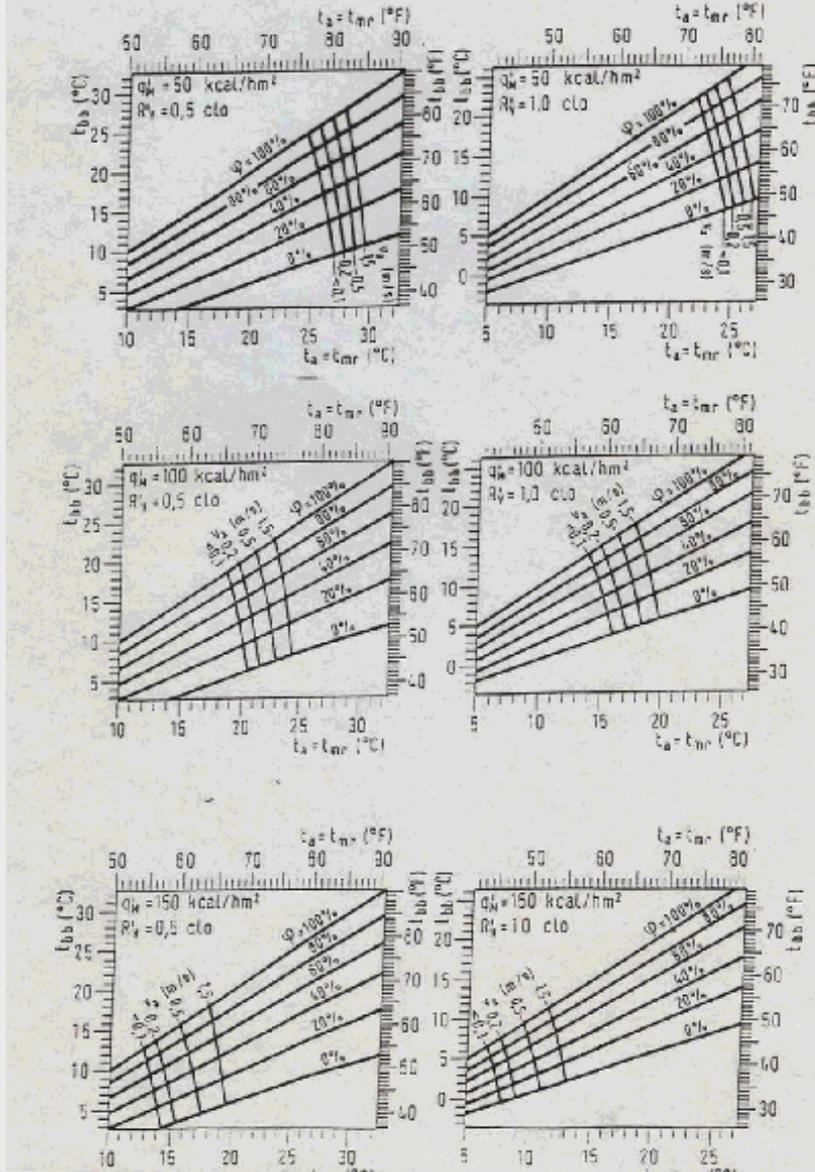
*Relazione tra le energie scambiate dal corpo con l'ambiente che consente di individuare **condizioni di equilibrio termico (omeotermia) per diversi valori delle grandezze termofisiche, di attività e di abbigliamento***

Problema indeterminato (una equazione per sei incognite)

Soluzione analitica in forma parametrica

Soluzioni espresse in modo grafico da cui si ricavano le relazioni tra i parametri in gioco in condizioni di equilibrio termico per l'organismo umano

Esempi di soluzioni grafiche dell'equazione del benessere



Criteri di valutazione del B. T. I.

Gli indici termo-igrometrici direttamente misurabili nell'ambiente (T_{ba} , T_{bb} , Φ , v_a), quelli analitici (T_{mr} , T_o) e quelli comportamentali (M , R_{cl}) danno una **valutazione parziale delle condizioni ambientali.**

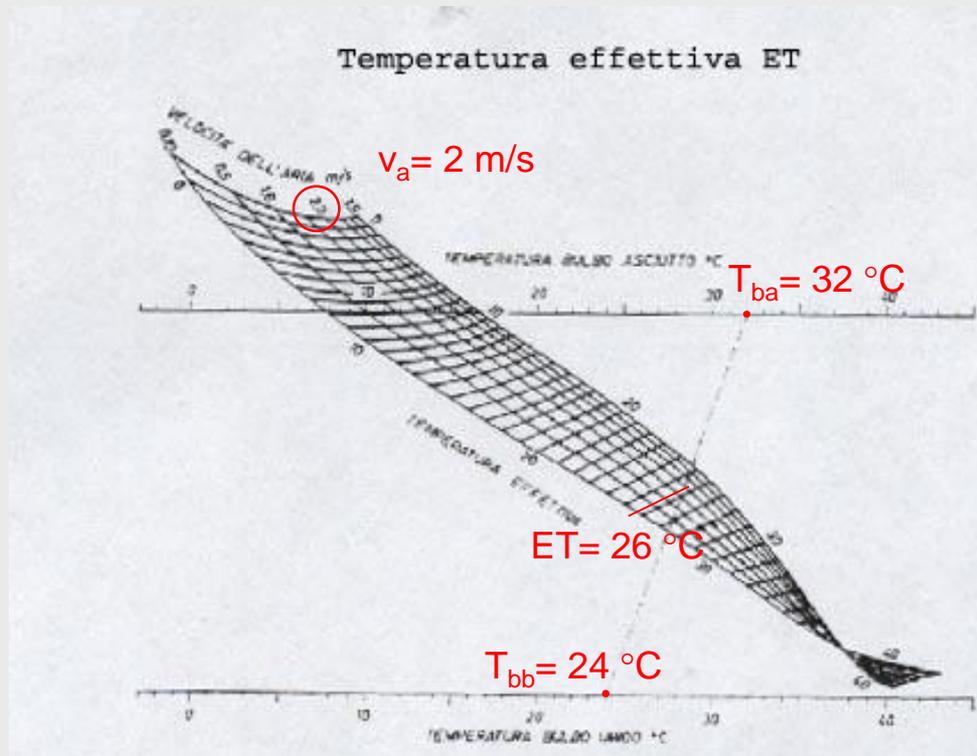
Un **criterio efficace** per la determinazione delle condizioni di B. T. I. deve tener conto anche dei **parametri soggettivi** che lo condizionano.

Questa considerazione ha portato a sviluppare alcuni **Indici empirici** atti a fornire una valutazione più completa delle condizioni di B. T. I. poiché **mettono in relazione i valori assunti dai parametri ambientali con le sensazioni termiche provate dall'individuo**

ET: Temperatura effettiva (ASHRAE-1923)

Confronto tra la **sensazione termica** provata da un **significativo numero di individui** in un ambiente di riferimento a microclima determinato e **l'ambiente reale** nel quale **viene fatta variare di volta in volta una delle tre grandezze** ritenute responsabili del benessere termometrico e di facile determinazione sperimentale: T_{ba} , T_{bb} e v_a .

Tutte le combinazioni dei tre parametri che forniscono la stessa sensazione termica danno luogo allo stesso valore di ET



Valori consigliati di ET:

19.5 °C per il periodo invernale

22 °C per il periodo estivo

L'indice **ET** in genere **sovrastima l'influenza dell'umidità** dell'aria alle **basse temperature** e la **sottovaluta** alle **alte temperature** e risulta efficacemente applicabile solo **per attività sedentaria e vestiario leggero**.

Per tener conto dell'influenza di eventuali sorgenti termiche radianti presenti nell'ambiente è preferibile adottare **al posto della T_{bb} la temperatura media radiante** misurata con un **globo-termometro**, costituito da una sonda a forma sferica di colore nero opaco che è in grado di tener conto degli scambi radiativi che avvengono sulla sua superficie

CET: Diretta evoluzione della ET, sostituendo la T_{bb} con la T_g (per correggere gli effetti derivanti da sorgenti con alta energia radiante).

Diagramma psicrometrico ASHRAE per il comfort termico

Sviluppato dall'Università del Kansas per conto dell'ASHRAE:

prove su un **campione di 1600 studenti**, *correlando statisticamente i parametri di sensazione del benessere, temperatura, umidità, sesso e tempo di esposizione.*

Gruppi di 10 studenti (5 maschi e 5 femmine) esposti a diverse condizioni termiche ambientali ottenute miscelando i diversi parametri termo-igrometrici.

Variazioni dei parametri:

t_{ba} 15.6 ÷ 37.6 °C, con incrementi di 1.1 °C

ϕ 15 ÷ 85 %, con incrementi del 10 %

$t_{mr} = t_{bb}$

$v_a < 0.17$ m/s

Sensazione espressa, dopo un periodo di acclimatazione (30 min – 3 ore):

Giudizio variabile 1 a 7

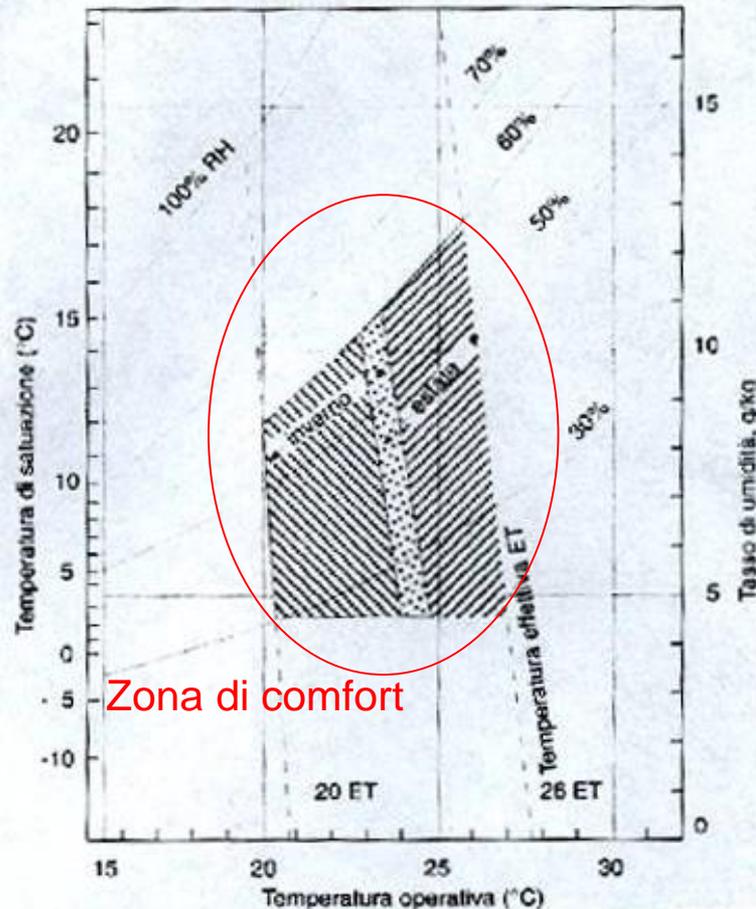
(da freddo a caldo attraverso sensazioni intermedie: fresco, leggermente fresco ecc.)

Condizioni di benessere:

quelle sulle quali converge il **parere dell'80% degli individui**

Norma ANSI/ASHRAE 55-92

“Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”,
allineata con la corrispondente ISO 7730:



Fornisce i valori raccomandati dei
parametri responsabili del
benessere

Valori ottimali:

Stagione invernale:

$T_o = 20 - 23.5 \text{ °C}$ a $\Phi = 60\%$

$T_o = 20.5 - 24.5 \text{ °C}$ per una $T_r = 2 \text{ °C}$

Stagione estiva:

$T_o = 22.5 - 26 \text{ °C}$ a $\Phi = 60\%$

$T_o = 23.5 - 27 \text{ °C}$ per una $T_r = 2 \text{ °C}$

Indici PMV e PPD

Le Norme danno indicazioni sui valori dei parametri che rendono le **condizioni ambientali accettabili**, cioè che garantiscono il **benessere almeno all'80%** degli utenti di un ambiente.

Studi condotti con metodi statistici dal danese **Fanger**:

PMV (Predicted Mean Vote - Voto Medio Previsto) utilizzabile per giudicare le condizioni termoigrometriche globali dell'ambiente (v_a , T_{bb} , T_{ba} , T_{mr}), tenendo conto anche dell'attività svolta e del tipo di abbigliamento indossato (R_{cl} ed M).

PMV: valore medio dei voti che un certo numero di individui attribuisce alle **condizioni termo-igrometriche** dell' ambiente in questione secondo la scala seguente:

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Molto freddo	Freddo	Fresco	Neutro	Tiepido	Caldo	Molto caldo

$$PMV = [0,303 \cdot e^{(-0,036 \cdot M)} + 0,028] \cdot F$$

dove F assume la seguente forma:

$$F = \left\{ \begin{array}{l} (M - L) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot A - 0,42 \cdot B - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) \\ - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot C \end{array} \right\}$$

in cui:

$$A = [5733 - 6,99 \cdot (M - L) - p_a]$$

$$B = [(M - L) - 58,15]$$

$$C = [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4]$$

p_a : pressione parziale del vapor d'acqua [Pa]

Il PPD è correlato sperimentalmente al PMV e può essere calcolato a sua volta con la seguente equazione empirica:

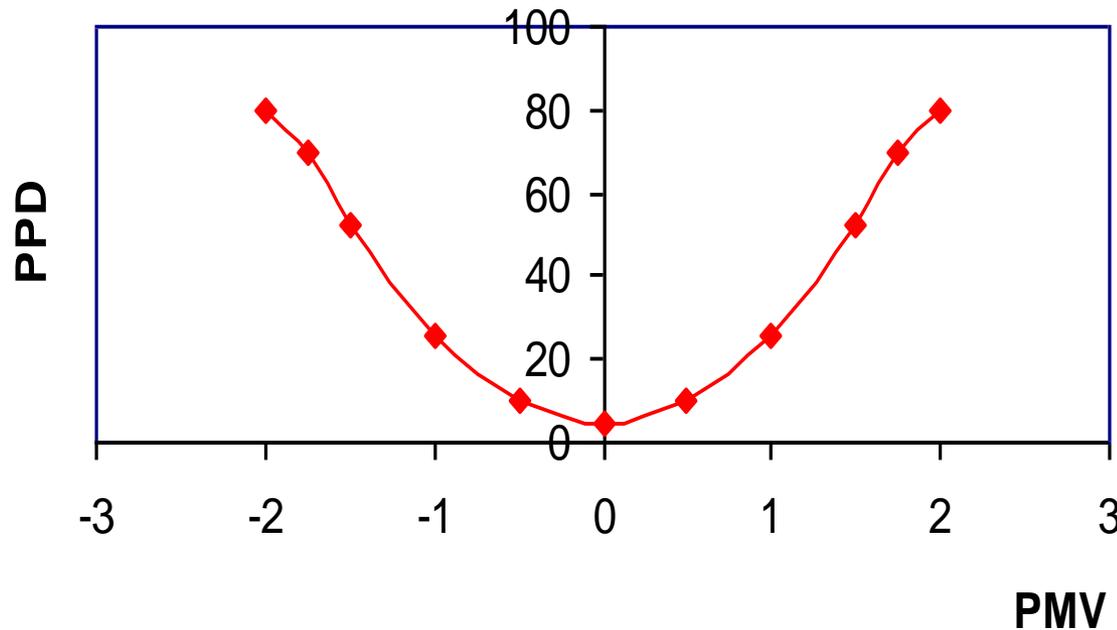
$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{[-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)]}$$

Ad ogni valore del PMV corrisponde un valore di:

PPD: Percentuale di Persone Insoddisfatte.

Insoddisfatti: coloro che dichiarano di sentire freddo/caldo o molto freddo/molto caldo.

PMV ottimale = 0



Anche in
corrispondenza di
PMV = 0, PPD = 5%

Il criterio di Fanger è applicabile per:

- Attività caratterizzate da $1 \text{ Met} < M < 4 \text{ Met}$
- Resistenza termica del vestiario compresa tra 0 e 2 clo
- Temperatura dell'aria e temperatura media radiante tra 10 e 30 °C
- Pressione parziale del vapore tra 0 e 2.7 kPa
- Velocità dell'aria compresa tra 0 ed 1 m/s.

Cause di discomfort termico locali

Anche in un ambiente caratterizzato dal valore ottimale dei parametri ambientali, l'individuo può risentire, in alcune parti del corpo, di sensazioni di disagio termico.

Principali cause di malessere termico localizzato sono:

Asimmetrie di irraggiamento termico

Correnti d'aria

Gradienti di temperatura dell'aria.

Asimmetrie di irraggiamento termico

Tipica condizione di malessere termico che si verifica in presenza di fenomeni di scambio termico per irraggiamento da parte del corpo umano con le superfici dell'ambiente caratterizzate da una temperatura superficiale non sufficientemente uniforme: **una o più superfici** hanno **temperature drasticamente diverse** dal valore medio delle restanti.

Particolarmente fastidiose sono le **temperature asimmetriche** radianti in **senso verticale**.

(Es. ampia superficie vetrata in regime invernale e/o estivo).

Correnti d'aria

Condizione di malessere localizzata (raffreddamento) delle parti del corpo investite da una corrente d'aria a velocità eccessiva che può verificarsi particolarmente negli ambienti con sistemi di condizionamento ad aria (ventilconvettori), o dotati di sistemi di ventilazione forzata.

Condizioni di velocità dell'aria fluttuanti sono molto più fastidiose di flussi costanti. Infatti, una fluttuazione della velocità dell'aria fa variare in modo continuo la temperatura cutanea che invia segnali di allarme a livello centrale.

Gradiente termico verticale

L'andamento termico verticale più adatto a realizzare il **comfort** prevede **temperature più elevate in basso e più basse nella parte alta** dell'ambiente.

La maggior parte dei corpi scaldanti movimentano **aria** in quantità significative innescando **fenomeni convettivi naturali** con moto ascensionale dell'aria più calda e **conseguente stratificazione dell'aria stessa**. In questo modo si realizza un **gradiente termico verticale opposto** a quello di benessere.

Un eccessivo gradiente termico verticale della temperatura dell'aria può provocare una **condizione di malessere localizzata**, oltre a produrre un significativo aumento del fabbisogno energetico dell'edificio.

I **pavimenti radianti** sono quelli che realizzano le **migliori condizioni** di benessere da questo punto di vista.

La ISO-DIS 7730 e l'ASHRAE 55-2004 impongono la differenza massima di temperatura tra le altezze di 1,1 m e 0,1 m dal suolo pari a 3°C

Secondo gli studi di OELSEN in questa situazione limite si ha un PPD pari al 5%

Valori ottimali dei parametri ambientali

La **Normativa ISO 7730** ha recepito il criterio di qualificazione degli ambienti mediante la determinazione dei parametri statistici PMV e PPD.

Temperatura operativa: (in prima approssimazione media aritmetica tra temperatura media radiante e temperatura dell'aria), definisce le condizioni ambientali che condizionano gli scambi radiativi e convettivi. E' il parametro di maggior influenza sul benessere.

Umidità relativa: L'umidità relativa influisce sul benessere termoigrometrico in modo meno rilevante rispetto alla temperatura operativa.

Generalmente si assegna un valore ottimale pari al $50\% \pm 5\%$.

Al di sotto del 30 % si irritano le mucose, al di sopra del 70 % si favorisce lo sviluppo di muffe in ambiente.

Velocità dell'aria: La velocità dell'aria influisce in modo sensibile sugli scambi convettivi tra individuo e ambiente e può provocare sensazioni di fastidio locale soprattutto ad individui dediti ad attività sedentarie se assume valori elevati tali da dar luogo alla formazione di correnti

Valori ottimali dei parametri ambientali

Norma **ISO 7730** (**condizioni invernali - 1 clo, 1.2 met**)

Temperatura operativa	20-24°C (UR = 50 %)
Gradiente verticale di temperatura dell'aria	max 3°C tra 0.1 e 1.1 m
Asimmetria temperatura media radiante	max 10 °C orizzontali e 5°C verticali
Velocità dell'aria	max 0.15 m/s
Temperatura superficiale del pavimento	19-29 °C

Valori ottimali dei parametri ambientali

Norma **ISO 7730** (condizioni estive – 0.5 clo, 1.2 met)

Temperatura operativa	23-26°C (UR = 50 %)
Gradiente verticale di temperatura dell'aria	max 3°C tra 0.1 e 1.1 m
Velocità dell'aria	max 0.25 m/s

La normativa italiana (**UNI 10339**: *Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Norme per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine, la fornitura.*) ha recepito le stesse indicazioni per i valori ottimali dei parametri ambientali