



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Prof. Carlo Antonio Stival
via A. Valerio 6/1
34127 Trieste
+390405583478
cstival@units.it

LEZIONE

**5
B**

Benessere termico

Corso di **Architettura Tecnica**

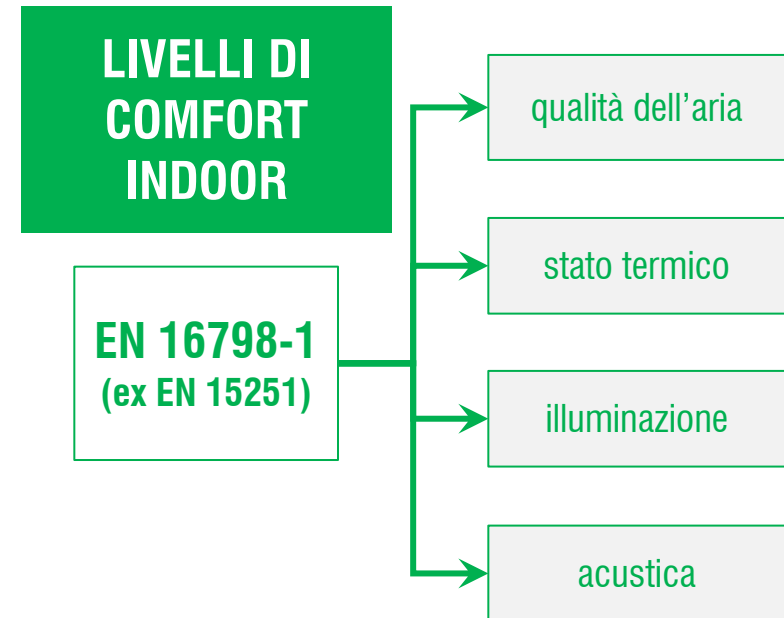
5_B-1

Equilibrio termico e comfort termico

Riferimenti di benessere indoor

Già con la direttiva 2002/91/CE si richiedeva che i **requisiti minimi** di **rendimento energetico** dovessero tener conto delle **condizioni** generali del **clima** degli **ambienti interni** allo scopo di **evitare** possibili **effetti negativi**.

Sulla base del lavoro sviluppato dal gruppo CEN/BT/WG 173 "Energy Performance of Buildings Project Group" sono state estese circa 40 norme europee, che stabiliscono metodologie di calcolo inerenti il rendimento energetico negli organismi edilizi ed il **comfort** degli **ambienti indoor**. In particolare è decisivo l'apporto fornito dalla norma **EN 15251:2008** inerente i **livelli di comfort**.



Riferimenti di benessere indoor

4

UNI 16798-1:2019 – CATEGORIE DI ASPETTATIVA PER BENESSERE E SALUBRITÀ NEGLI AMBIENTI INDOOR

1

alto livello di aspettativa,
adeguato a spazi occupati da utenze sensibili e con particolari necessità, quali
disabili ed anziani

2

medio livello di aspettativa,
da garantire in interventi di nuova costruzione e di ristrutturazione

3

livello accettabile, o moderato, di aspettativa,
riferibile ad organismi edilizi esistenti

4

livello inferiore al minimo accettabile,
applicabile ed accettabile solo per alcuni periodi limitati dell'anno

Bilancio termico dell'individuo

Il benessere termico è definito a partire dalle **sensazioni termiche** degli individui, ed è quindi legato alla **termoregolazione** del **corpo umano**.

Per la sopravvivenza dell'individuo, è necessario che il corpo umano sia **in equilibrio con l'ambiente** in cui si trova, vale dire che l'**energia scambiata** con l'ambiente deve essere **pari** all'**energia prodotta** dal **metabolismo**; la stazionarietà della temperatura corporea che porta alla confortevole sensazione di equilibrio si definisce **omotermia** e può essere espressa attraverso il bilancio:

$$(M - W) - E - C_{resp} - (R + C) = \Delta Q$$

Calore accumulato. Se il comfort è ricercabile annullando tale valore, è necessario che i contributi che squilibrano il bilancio debbano essere ripresi e contenuti da un opportuno sistema di condizionamento.

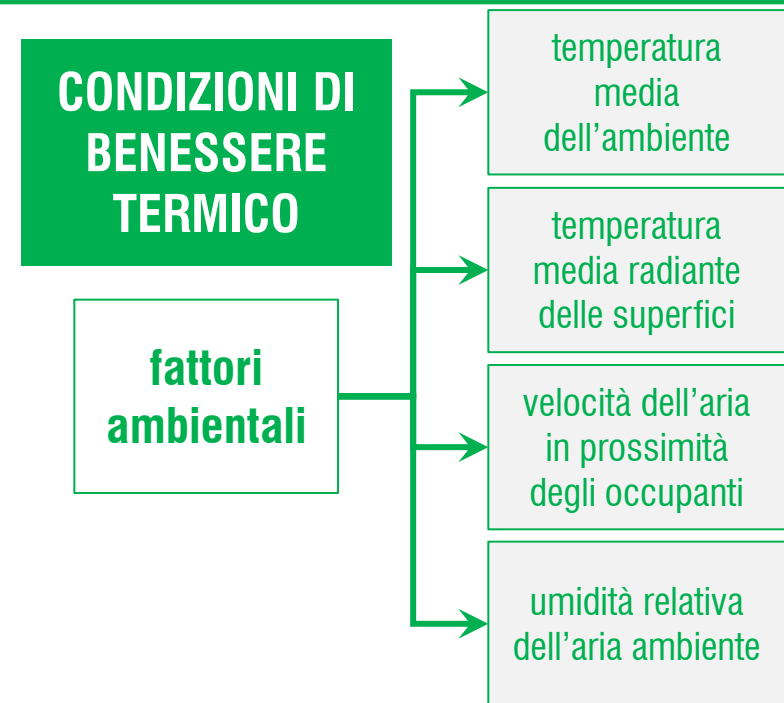
nel quale compaiono i seguenti contributi:

- l'**energia interna metabolica M**, funzione dell'attività svolta dall'individuo, normalmente riferito all'unità di superficie corporea;
- il **lavoro meccanico W** svolto dall'individuo;
- gli **scambi termici** per **evaporazione E**, correlabili ai contributi di traspirazione (diffusione del vapore acqueo) e sudorazione. I due contributi dipendono dalla temperatura dell'epidermide, da temperatura, pressione umidità e velocità dell'aria, infine dalla permeabilità al vapore dell'abbigliamento;
- gli **scambi convettivi** legati alla **respirazione C_{resp}**;
- gli **scambi termici** per **irraggiamento R** e per **convezione C**. Lo scambio termico per irraggiamento dipende dalla **resistenza termica** offerta dal **vestiario**, dalla sua temperatura, dalla **temperatura media radiante** delle **superfici** che costituiscono il perimetro dell'ambiente.

Bilancio termico dell'individuo

Il comfort in un ambiente confinato può essere descritto individuando fattori legati all'individuo:

- la **temperatura dell'aria nell'ambiente confinato** t_a ; questo parametro influisce direttamente sulla sensazione di benessere termico poiché regola lo scambio termico per convezione;
- la **temperatura media radiante delle superfici** che delimitano l'ambiente t_{mr} ; si assume per semplificare il calcolo degli scambi termici per irraggiamento;
- la **velocità** v_a assunta **dall'aria** nell'ambiente ed in prossimità degli occupanti;
- l'**umidità relativa** U_R nell'aria ambiente, che determina gli scambi di vapore acqueo tra l'individuo e l'ambiente;



Grandezze	T_{oper}	$t_{1,1} - t_{0,1}$	T_{Floor}	$T_{RadFloor}$	v_{aria}	u_{rel}
Condizioni invernali	$22 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	$< 3 \text{ } ^\circ\text{C}$	$19 \div 26 \text{ } ^\circ\text{C}$	$29 \text{ } ^\circ\text{C}$	$0,12 \div 0,15 \text{ m/s}$	$40 \div 60\%$
Condizioni estive	$24,5 \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$< 3 \text{ } ^\circ\text{C}$	T_{aria}	T_{aria}	$0,25 \div 0,30 \text{ m/s}$	$30 \div 70\%$

Bilancio termico dell'individuo

e fattori ambientali, tipici dello spazio confinato:

- il **tasso metabolico M**, potenza termica generata dagli occupanti e dipendente dall'attività svolta; si impiega un'unità di misura incoerente, il **met** (58,2 W/m²) che equivale all'attività di una persona di media corporatura seduta, in quiete. Se $M > 2 \text{ met}$, è opportuno ridurre la temperatura indoor per agevolare la dissipazione di calore;
- la **resistenza termica dell'abbigliamento I_{CL}** dell'utenza, misurata anche in questo caso con una unità incoerente, il **clo**, pari ad una resistenza termica di 0,155 m²K/W. Il valore è tipico di un abbigliamento leggero che copra interamente la superficie corporea; la resistenza termica di un tipico abbigliamento estivo è pari a 0,5 clo, in inverno invece l'aggiunta di un cappotto al ricorrente abbigliamento può portare ad una resistenza termica complessiva di 2 clo.



ATTIVITÀ	ENERGIA METABOLICA [met]
Riposo disteso	0,8
Riposo seduto, rilassato	1,0
Attività sedentaria	1,2
Attività leggera in piedi	1,6
Attività media in piedi	2,0
Cammino a 2 km/h	1,9
Cammino a 3 km/h	2,4
Cammino a 4 km/h	2,8
Cammino a 5 km/h	3,4

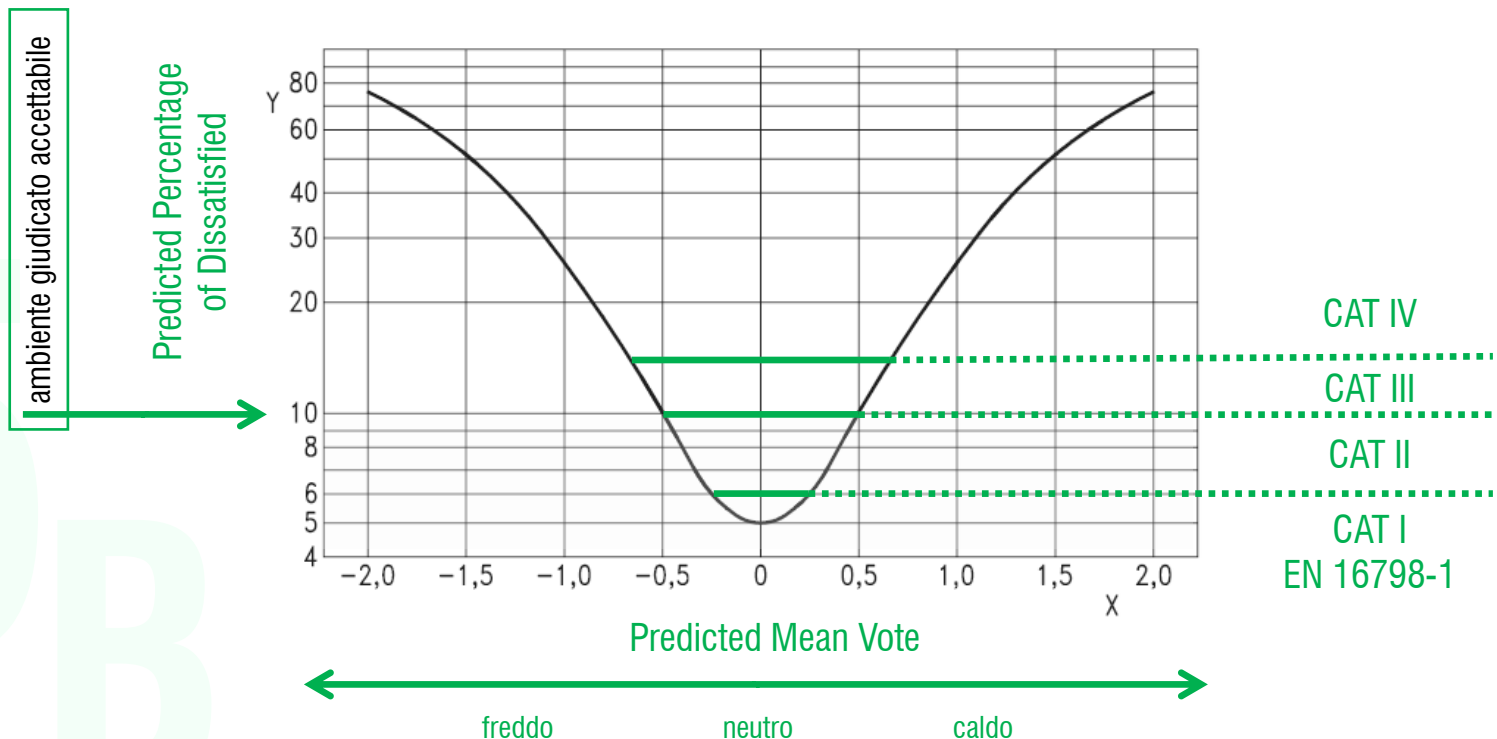
Condizioni di comfort termico

La condizione di comfort termico, quindi, si manifesta quando l'individuo esprime un giudizio di soddisfazione, ossia di **neutralità termica**, nei confronti dell'ambiente.

Se dunque una generica equazione del benessere è:

$$comf = f(M, I_{CL}, t_a, v_a, \varphi_a, t_{mr}, t_{dress}, E) = 0$$

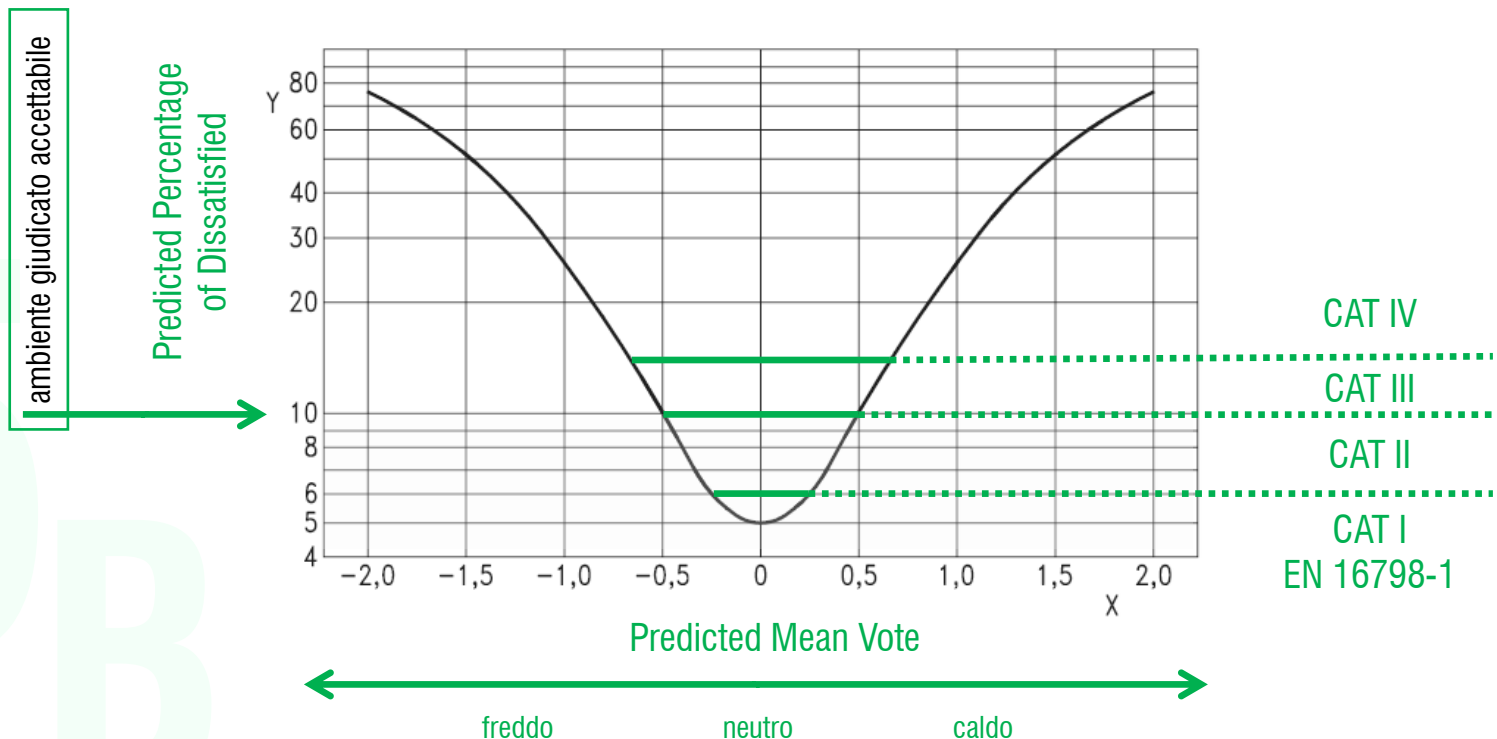
la funzione "comf" può essere azzerata secondo approcci diversi, ad esempio **controllando alcuni parametri** e mantenendo immutati altri.



Condizioni di comfort termico

Si è così introdotta una scala di voti da assegnare ad un ambiente confinato, compresa entro l'intervallo $[-3; +3]$. Tale indice, denominato PMV (**Predicted Mean Vote**), è ottenibile per via sperimentale secondo indicatori statistici.

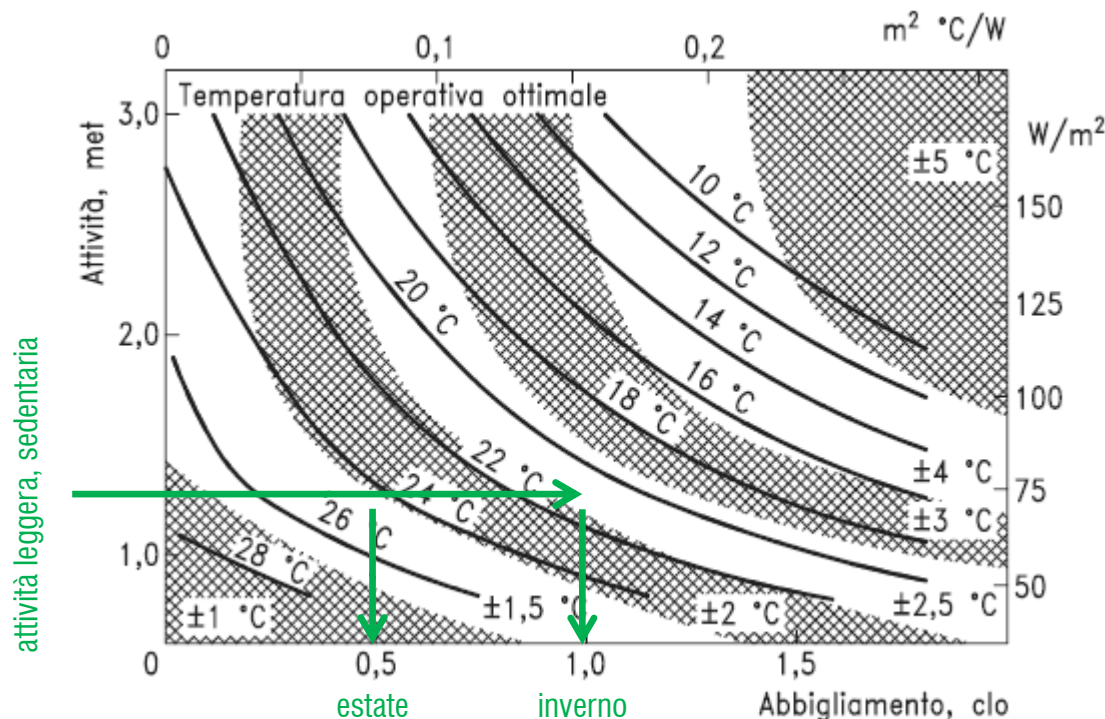
Un ambiente è giudicato accettabile quando la percentuale prevista di utenti insoddisfatti, valutabile con l'indice PPD (**Predicted Percentage of Dissatisfied**) è inferiore al 10%; a questa percentuale corrisponde un valore assoluto di PMV inferiore a 0,5.



Condizioni di comfort termico

Se gli **scambi radiativi** dipendono dalla **temperatura superficiale** delle pareti, e gli **scambi convettivi** dalla **temperatura dell'aria**, per la determinazione delle condizioni di benessere si impiega la **temperatura operativa**, dipendente dalla temperatura dell'aria, dalla temperatura media radiante e, dalla velocità dell'aria.

È quindi possibile descrivere l'andamento del **PMV** in funzione dei **fattori tipici dell'individuo**, M e I_{CL} : si evidenziano così le **curve di benessere** al variare della **temperatura dell'aria**. Per bassi valori di resistenza termica del vestiario e di metabolismo sono preferibili temperature elevate, e viceversa.



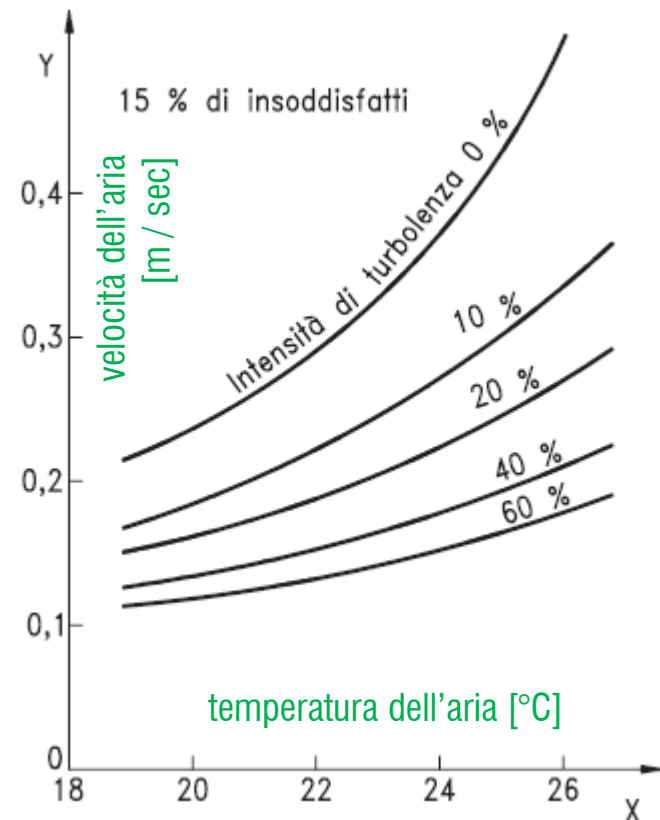
Valore ottimale della temperatura operativa, corrispondente a $PMV=0$, in funzione dell'attività svolta e dell'abbigliamento; l'umidità relativa nell'ambiente si suppone pari al 50%

Condizioni di comfort termico

Se i due indici PMV e PPD permettono di individuare condizioni accettabili di comfort termico in ambienti confinati per la maggior parte dell'utenza, restano comunque **esclusi** da questa stima **eventuali effetti di discomfort** che interessino una specifica parte corporea, ossia **disagi locali**. I più frequenti sono causati dalle **correnti d'aria**. In questo caso è possibile stimare la **percentuale di persone insoddisfatte** attraverso l'indicatore DR (**Draught Rating**), funzione della temperatura dell'aria, della velocità della corrente e dell'intensità locale dell'aria.

Il rischio da corrente d'aria è ovviamente inferiore per attività che sviluppino un tasso metabolico superiore alle attività sedentarie.

Il **rischio** derivante si può **contenere** mantenendo la **velocità locale** delle correnti d'aria entro il valore guida di **0,2 m/sec**, comunque variabile in base alla temperatura interna.



5_B.2

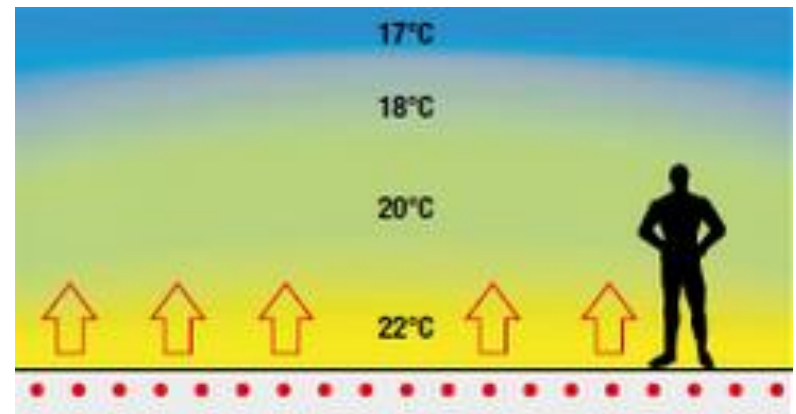
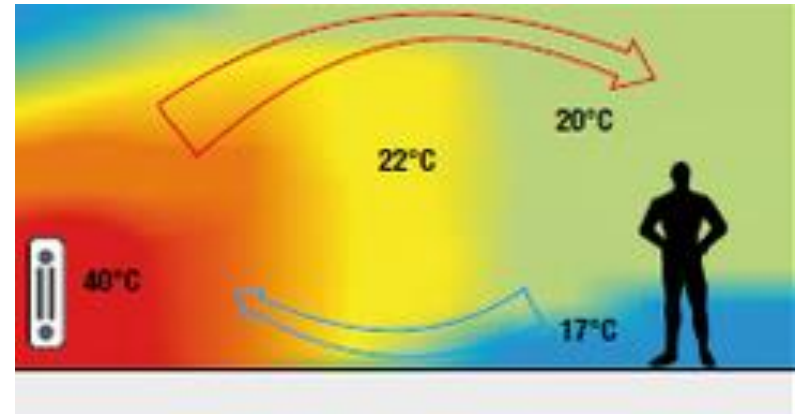
Controllo delle condizioni di comfort termico

Relazione con i terminali di emissione

Un notevole disagio locale può essere causato da un elevato **gradiente verticale** della **temperatura** dell'aria indoor, che induce stati termici diversi a testa e caviglie. Tale condizione è strettamente connessa alla **tipologia** di **condizionamento** invernale, e specificamente ai **terminali di emissione**.

Il riscaldamento ottimale in tal senso deve garantire:

- un congruo ed **equilibrato riscaldamento** delle **superfici interne**;
- una quota **preponderante** di **scambio termico** per irraggiamento;
- una ridotta temperatura superficiale dei terminali e, conseguentemente, una **ridotta temperatura** di circolazione del **fluido termovettore**;
- ridotti gradienti di temperatura tra le diverse superfici;
- **trascurabili fenomeni** di sollevamento e **circolazione** delle **polveri**.



Relazione con i terminali di emissione

radiatori, convettori

Comportano un'asimmetria nella distribuzione della temperatura dell'aria indoor.

Permettono la circolazione di pulviscolo e di polveri.

pannelli radianti a pavimento

Sono i terminali più adatti, privilegiando infatti la trasmissione del calore per irraggiamento.

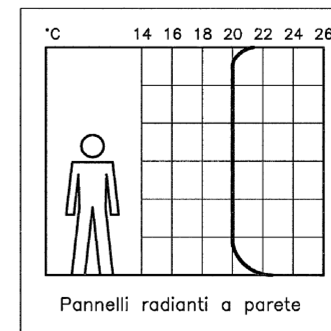
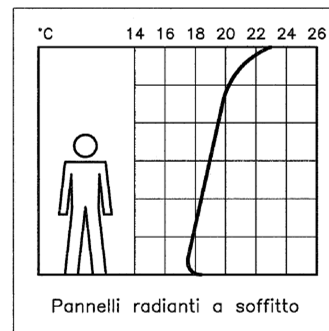
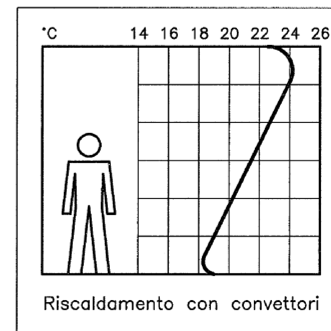
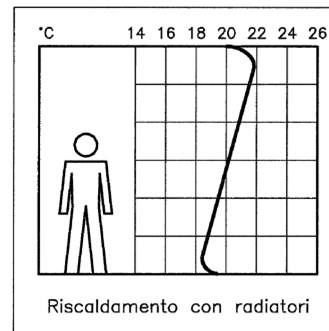
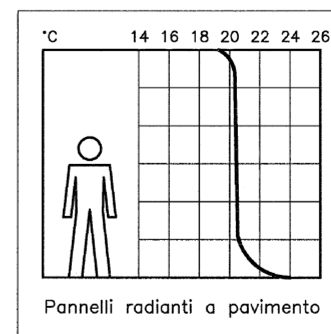
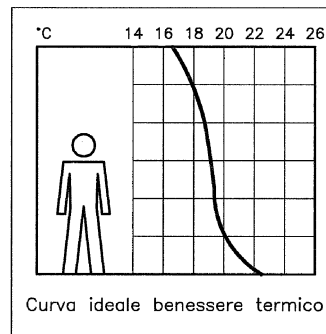
Evitano inoltre la combustione del pulviscolo atmosferico e la circolazione della polvere.

pannelli radianti a parete

Permettono l'ottimale distribuzione della temperatura in ambiente, ma rendono non fruibile la parete d'installazione

pannelli radianti a soffitto

Poco efficaci, poiché creano la stratificazione dell'aria calda ed un conseguente layer di aria fredda a quota pavimento.

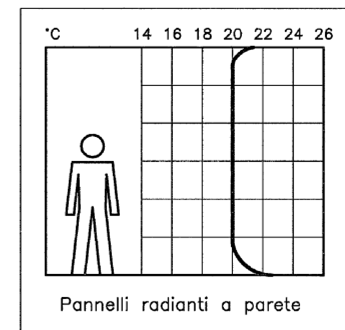
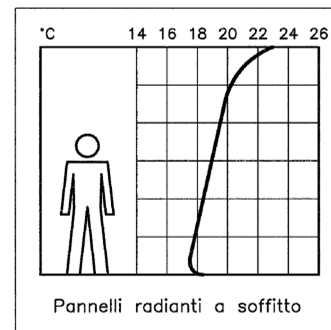
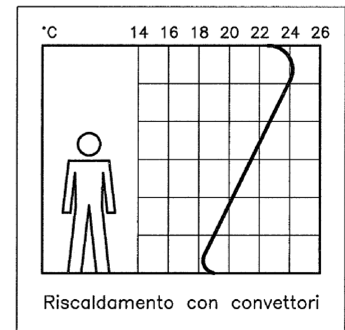
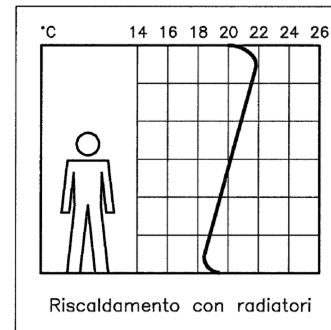
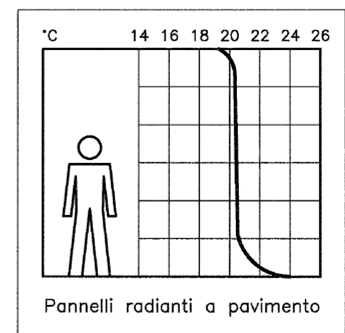
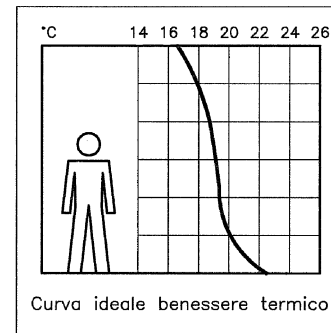


Relazione con i terminali di emissione

I pannelli radianti privilegiano l'**irraggiamento** come modalità di trasmissione del calore e, a pavimento, possono descrivere una **curva** di **benessere termico prossima** a quella di comfort **ottimale**. Rispetto ai radiatori, inoltre, evitano la combustione del pulviscolo presente nell'aria ed una elevata circolazione di polvere.

La predisposizione di pannelli radianti a parete consente ancora una buona resa rispetto alla curva di benessere termico; **meno efficace** è il posizionamento del sistema radiante **a soffitto**, che induce una **stratificazione dell'aria calda** all'interno dell'ambiente producendo un layer di aria fredda alla quota del pavimento.

La disposizione a **pavimento**, ottimale per il servizio di riscaldamento, può essere impiegato con **discreti risultati** anche per il **raffrescamento**, in quanto generalmente il pavimento è la prima superficie interna ad essere colpita dalla radiazione solare in entrata.

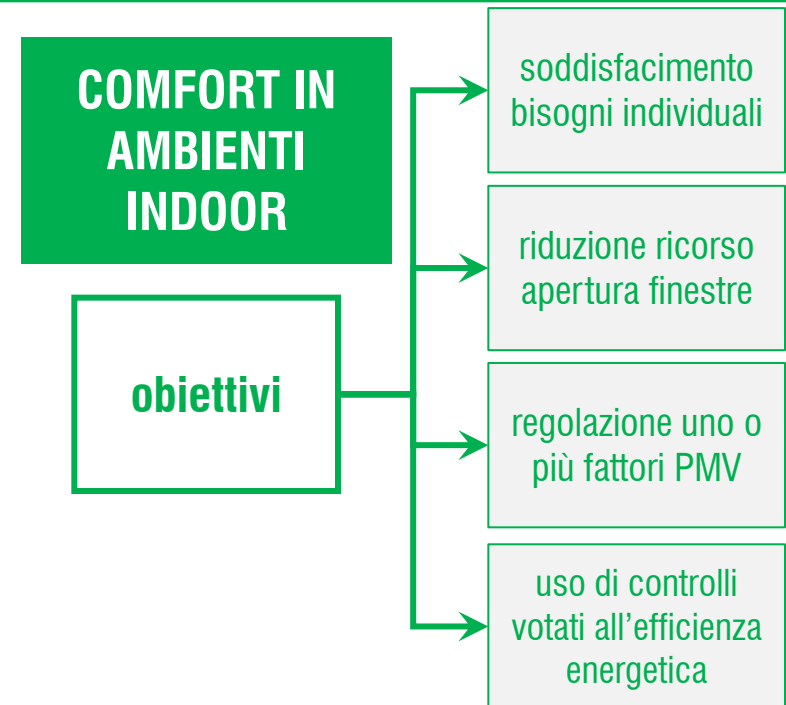


Comfort in ambienti confinati

Negli ambienti confinati con sistemi di climatizzazione estiva devono essere previsti **dispositivi di controllo** della **temperatura** dell'**aria interna**, tali da rendere possibile l'adattamento delle condizioni microclimatiche ad una congrua variabilità termica.

L'obiettivo è raggiungibile con la **parzializzazione** degli **spazi funzionali** dell'edificio, al fine di consentire la **regolazione puntuale** della **temperatura** dell'aria interna da parte del singolo fruitore o di gruppi omogenei di utenza che ne impiegano gli spazi principali.

In particolare, è essenziale che il sottosistema di controllo e regolazione consenta di operare **modifiche** ad almeno uno dei **fattori ambientali** che determinano l'indice di comfort PMV.

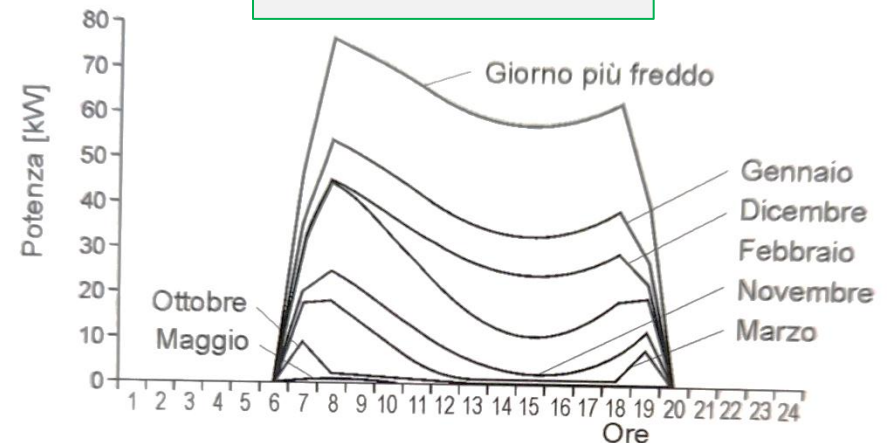


Controllo adattativo del comfort termico

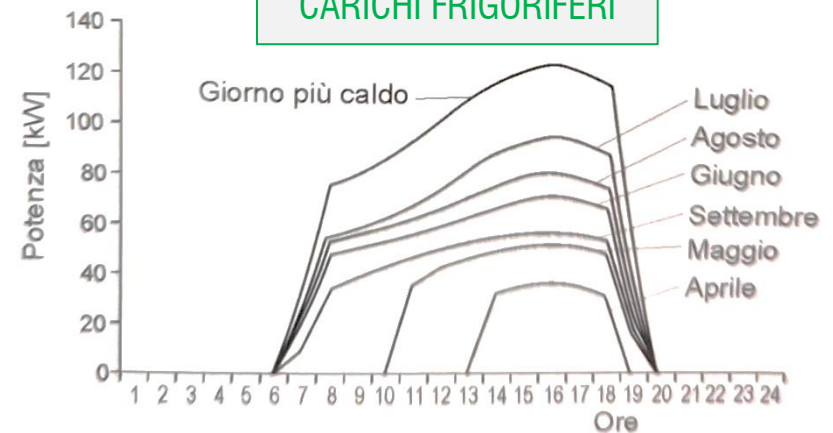
È innanzitutto necessario evidenziare che la **regolabilità** di un impianto di climatizzazione estiva dipende dalla **configurazione** assunta dai **sottosistemi** di **distribuzione** e **regolazione**; bisogna quindi optare per una tipologia impiantistica capace di **differentiare opportunamente** la **richiesta** di **carico termico** in grado di contrastare la sollecitazione termica complessiva gravante in un ambiente confinato.

La parzializzazione del carico massimo deve essere possibile anche in presenza di carichi termici particolari, derivanti da un elevato affollamento o da altre apparecchiature fonte di carichi endogeni.

CARICHI TERMICI



CARICHI FRIGORIFERI



Controllo adattativo del comfort termico

Posizione del terminale rispetto all'ambiente	Tipologia a fluido intermedio	Tipologia ad espansione diretta
Terminale in ambiente	Impianti ad acqua	Impianti con condizionatori autonomi
	Fan coil a 2 tubi	Split-system e multisplit
	Fan coil a 4 tubi	Sistemi ad anello d'acqua
Sistema misto	Impianti misti	
	Fan coil a 2 e 4 tubi + aria primaria	Sistemi a portata d'aria costante o variabile + recupero di calore
	Sistema radiante + aria primaria	Sistemi ad anello d'acqua + aria primaria
Terminale remoto	Impianti ad aria	
	Per singola zona, a portata costante o variabile	
	Per singola zona, a portata costante o variabile, con post-riscaldamento di zona	
	Multizona	
	Doppio canale, a portata costante o variabile	Condizionatori canalizzabili

N.B. In verde, le soluzioni che permettono di climatizzare ambienti con stati termici opposti

Quadro riassuntivo

Impianti ad acqua

Controllo della temperatura a livello del singolo fan coil (2 e 4 tubi): massima prestazione con controllo on-off sull'aria

Bilancio di carichi termici di segno opposto in locali distinti (4 tubi)

Nessun controllo dei ricambi d'aria

Impianti misti

Elevata regolabilità da parte dell'utenza

Riduzione del rischio di elevata umidità relativa con la regolazione on-off ai fan coil

Impianti a tutt'aria

Singola zona: non possibile la parzializzazione della regolazione

Singola zona: per esposizione omogenea ed impiego non continuativo

Multizona a portata variabile: ridotto controllo del ricambio d'aria; solo per locali con carico termico concorde

Multizona: controllo limitato di temperatura e umidità relativa

Postriscaldamento di zona: azione sulla temperatura di immissione per governo di carichi termici discordi

Doppio canale: controllo della temperatura di immissione attraverso la miscelazione dell'aria in ingresso