

---

# **Analisi dello stato dell'arte e individuazione dei criteri per la misurabilità delle performance richieste al manager del comfort termoigrometrico**

Vittorio Miori (CNR) – Dario Russo (CNR) – Luca Ferrucci (CNR) – Loredana Pillitteri (CNR)

## Breve sommario

Lo scopo del documento è l'individuazione dei criteri per misurare le performance del manager del comfort termoigrometrico. A tal fine viene passato in rassegna lo stato dell'arte dei parametri da valutare, i relativi indici di comfort termoigrometrico e la normativa di riferimento. Vengono altresì evidenziate e spiegate le principali grandezze da misurare. Infine vengono fatti alcuni cenni su alcuni strumenti per la misura di tali grandezze microclimatiche.

## Parole chiave

Comfort termoigrometrico, PMV, PPD, termoregolazione, benessere termoigrometrico, microclima, discomfort

## Indice

Breve sommario .....	2
Parole chiave.....	2
Indice .....	3
Indice delle figure .....	5
Introduzione .....	6
Microclima e Comfort termoigrometrico .....	7
Energia e Comfort ambientale.....	9
Il comfort termico e i Criteri Ambientali Minimi.....	11
Calcolo e analisi degli indici di comfort termico PMV e PPD secondo il metodo di Fanger e la UNI EN ISO 7730 .....	11
Valutazioni del comfort del fabbricato .....	15
Calcolo del discomfort termico locale .....	17
Valutazione globale estiva ed invernale del benessere termico locale e classificazione degli ambienti termici.....	18
Benessere termoigrometrico e comfort termico .....	19
Modelli di comfort termico.....	20
COMFORT SECONDO FANGER .....	20
COMFORT ADATTIVO .....	20
IL sistema di termoregolazione.....	21
Comfort termico per il corpo umano nel suo complesso .....	22
Comfort termico e indici di benessere per ambienti moderati .....	24
Discomfort termico locale .....	27
Discomfort per corrente d'aria .....	27
Discomfort per differenza verticale della temperatura dell'aria.....	29
Discomfort per pavimenti caldi o freddi .....	30
Discomfort per asimmetria radiante .....	31
Condizioni di benessere stagionali .....	33
Il Benessere Termoigrometrico.....	35
Il disagio locale .....	41
Equazione di Bilancio.....	49
Metabolismo .....	51
Cresp: calore scambiato attraverso la respirazione .....	52
Il flusso termico convettivo e radiativo C E R.....	52
Temperatura operativa .....	53
Resistenza termica dell'abbigliamento .....	54

Calore scambiato per evaporazione cutanea.....	57
Normativa UNI EN ISO 7730 .....	58
Normativa UNI EN ISO 7730 .....	59
Normativa UNI EN ISO 7730 – UNI EN 15251 .....	60
MODELLO DI COMFORT ADATTIVO .....	63
Strumenti per la misura delle grandezze microclimatiche.....	68
PSICOMETRO .....	69
GLOBOTERMOMETRO .....	70
SONDA ANEMOMETRICA.....	71
RADIOMETRO NETTO.....	72
Conclusioni .....	73
Riferimenti.....	74

## Indice delle figure

Figura 1: il Comfort ambientale .....	9
Figura 2: il Comfort termoigrometrico dell'individuo .....	11
Figura 3: insoddisfatti in funzione del voto medio previsto.....	15
Figura 4: insoddisfatti per il discomfort .....	16
Figura 5: discomfort per asimmetria radiante .....	17
Figura 6: l'ambiente termico - classificazione.....	18
Figura 7: Omotermia dell'organismo umano .....	21
Figura 8: potenza termica scambiata dal corpo umano.....	22
Figura 9: votazione della sensazione termica .....	24
Figura 10: PPD in funzione del PMV .....	25
Figura 11: voto medio previsto in funzione degli insoddisfatti.....	26
Figura 12: il disagio per le correnti d'aria .....	28
Figura 13: insoddisfatti per correnti d'aria in funzione della temperatura.....	28
Figura 14: discomfort per differenza verticale di temperatura.....	29
Figura 15: insoddisfatti in funzione della differenza verticale di temperatura .....	29
Figura 16: discomfort per pavimenti caldi/freddi.....	30
Figura 17: insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento.....	31
Figura 18: discomfort per asimmetria radiante .....	32
Figura 19: insoddisfatti in funzione dell'asimmetria radiante .....	32
Figura 20: temperatura al bulbo secco .....	34
Figura 21: Correlazioni tra temperatura esterna, velocità relativa dell'aria e umidità relativa.....	37
Figura 22: correlazioni tra temperatura dell'aria, temperatura media radiante e velocità dell'aria .....	38
Figura 23: Correlazioni tra temperatura dell'aria, velocità relativa dell'aria e attività svolta.....	39
Figura 24: differenza verticale di temperatura .....	42
Figura 25: asimmetria della temperatura media radiante.....	42
Figura 26: pavimento troppo caldo/freddo .....	42
Figura 27: correnti d'aria .....	43
Figura 28: insoddisfatti in funzione della differenza verticale di temperatura .....	43
Figura 29: insoddisfatti in funzione della temperatura radiante .....	44
Figura 30: insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento.....	45
Figura 31: insoddisfatti per correnti d'aria in funzione di velocità media e temperatura dell'aria .....	47
Figura 32: insoddisfatti in funzione dell'intensità della turbolenza .....	48
Figura 33: l'organismo tende a permanere in condizioni di equilibrio omeotermo .....	50
Figura 34: il Comfort adattivo .....	63
Figura 35: psicometro .....	69
Figura 36: globotermometro .....	70
Figura 37: sonda anemometrica .....	71
Figura 38: radiometro netto .....	72

## Introduzione

La relazione che sussiste tra le caratteristiche di un ambiente e la percezione che ne ha l'individuo che lo vive può essere investigata sotto vari aspetti (termoigrometrici, acustici, illuminotecnici, chimici, ...), da diversi punti di vista (globale, locale, collettivo, individuale, ...) e privilegiando approcci distinti (ingegneristico, biometeorologico, fisiologico, psicologico, medico, climatologico, ...) [1].

Innumerevoli sono gli studi pubblicati in merito a tecniche e strategie per identificare dei parametri caratterizzanti le performance di comfort di un edificio al fine di [2] [3]:

- 1) Prevedere le risposte soggettive agli stimoli esterni;
- 2) Definire il campo di temperature entro cui il comfort può ritenersi raggiunto;
- 3) Valutare la risposta psicofisica umana alle caratteristiche termoigrometriche dell'ambiente circostante;
- 4) Correlare tra loro le grandezze fisiche significative in modo da comprendere come queste si compongano nella sensazione di comfort globale percepita dall'utenza;
- 5) Descrivere quantitativamente la capacità dell'ambiente di vita (e della sua impiantistica) di creare condizioni di benessere long-term;
- 6) Prevenire possibili fenomeni di discomfort e le relative conseguenze sulla salute degli occupanti, in particolare in presenza di categorie deboli (anziani, bambini, malati, ...), ma anche fenomeni di assenteismo, scarsa produttività, sick building syndrome (SBS) [4].

Negli ultimi 20 anni, inoltre, il peso sempre maggiore del settore residenziale (inteso come ambiente di vita e di lavoro, al di fuori dei reparti aziendali dedicati alla produzione) sui consumi energetici [5] [6], ha reso necessario ampliare il target di progettazione: dal "solo" benessere ambientale al connubio comfort-risparmio energetico nell'ottica di migliorare l'efficienza in tali ambienti, integrando nella modellizzazione anche il ruolo svolto dall'impiantistica e dalla fisica dell'edificio [8]. La sinergia tra gli ambienti di vita o di lavoro e i suoi occupanti è diventata sempre più al centro delle scelte progettuali, anche in termini di sicurezza e salute, ed è supportata dallo sviluppo di nuovi sistemi e tecnologie per il controllo e la gestione dei parametri microclimatici negli ambienti indoor [9] [10].

## Microclima e Comfort termoigrometrico

Il microclima è dunque l'insieme di tutti quei parametri che caratterizzano l'ambiente e che determinano gli scambi termici tra i corpi.

Il benessere (o comfort) termoigrometrico in un ambiente confinato è stato definito dall'American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE) come la "condizione mentale in cui è espressa soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico" [11]. Ciò significa che il soggetto che occupa un locale non desidera né un ambiente più caldo né più freddo. Allo stesso tempo, il soggetto non desidera né che l'aria sia più umida né più secca, né percepisce odori sgradevoli e neanche viene investito da correnti d'aria. Inoltre, l'aria interna deve essere pura, frequentemente ricambiata e non contaminata da sostanze inquinanti.

Il comfort termico è legato agli scambi di calore tra uomo e ambiente e alla termoregolazione del corpo umano. All'interno di un ambiente interno, il corpo umano scambia calore sensibile con ciò che lo circonda: per convezione con l'aria, per conduzione con il suolo/pavimento e per irraggiamento con le altre superfici. Inoltre, il corpo disperde calore latente tramite i processi di respirazione e di evapotraspirazione della pelle. Anche le attività del metabolismo umano producono energia che viene trasmessa attraverso lavoro e calore, in quantità variabile all'azione svolta. Se avviene un accumulo o una perdita di energia, allora il corpo interviene attraverso dei meccanismi di regolazione che permettono di mantenere la temperatura interna costante a 37°C.

Un ambiente si trova in condizioni termicamente confortevoli "quando la maggior parte delle persone poste all'interno dello stesso, che siano in analoghe condizioni di vestiario e attività fisica, non preferirebbe una temperatura più alta o più bassa".

Condizioni di benessere in periodi invernali (con riscaldamento) in presenza di attività leggere (di tipo sedentario):

- la "temperatura operativa compresa tra 20 °C e 24 °C";
- "la differenza verticale di temperatura dell'aria tra 1,1 m e 0,1 m dal pavimento minore di 3 °C;
- la temperatura superficiale del pavimento normalmente compresa tra 19 °C e 26 °C, (ci sono però sistemi di riscaldamento a pavimento a 29 °C);
- l'asimmetria della temperatura radiante dovuta a finestre o ad altre superfici fredde verticali deve essere minore di 10 °C (rispetto a un piano verticale posto a 0,6 m dal pavimento);
- l'asimmetria della temperatura radiante dovuta ad un soffitto caldo (riscaldato) deve essere minore di 5 °C (rispetto a un piano orizzontale posto a 0,6 m dal pavimento);
- l'umidità relativa deve essere compresa tra il 30% e il 70%".

Condizioni di benessere in periodi estivi, con riferimento alle stesse attività:

- la "temperatura operativa deve essere compresa tra 23 °C e 26 °C";
- la differenza verticale di temperatura dell'aria tra 1,1 m e 0,1 m dal pavimento deve essere minore di 3 °C;
- l'umidità relativa deve essere compresa tra il 30% e il 70%.

In entrambi i casi occorre tener conto della velocità media dell'aria.

Il confort microclimatico negli ambienti di lavoro è previsto nella normativa sulla tutela della salute e sicurezza dei lavoratori. Il DL 81/2008, nel Titolo VIII (art. 180), dice che il microclima tra gli agenti fisici, ai sensi dell'art. 181, deve essere compreso nella valutazione dei rischi. Esso deve essere valutato con riferimento alle norme di buona tecnica (UNI, ISO ecc.) ed alle buone prassi in modo da identificare ed adottare le più adeguate misure di prevenzione e protezione.

La valutazione del microclima ambientale e del confort dei lavoratori avviene mediante la misurazione di parametri ambientali e individuali. Specifici indici di confort permettono di esprimere numericamente le condizioni microclimatiche di un ambiente.

## Energia e Comfort ambientale

La problematica del contenimento dei consumi energetici di un edificio è legata sia alla quantità di combustibile che si deve fornire allo stesso per un suo ottimale utilizzo sia all'andamento di numerosi parametri che coinvolgono l'intero sistema EDIFICIO-IMPIANTO [13].

Esiste infatti una profonda correlazione tra la domanda di energia e il COMFORT AMBIENTALE interno, poiché i fattori che caratterizzano quest'ultimo incidono direttamente sui consumi per riscaldamento, ventilazione, climatizzazione e illuminazione di un edificio.

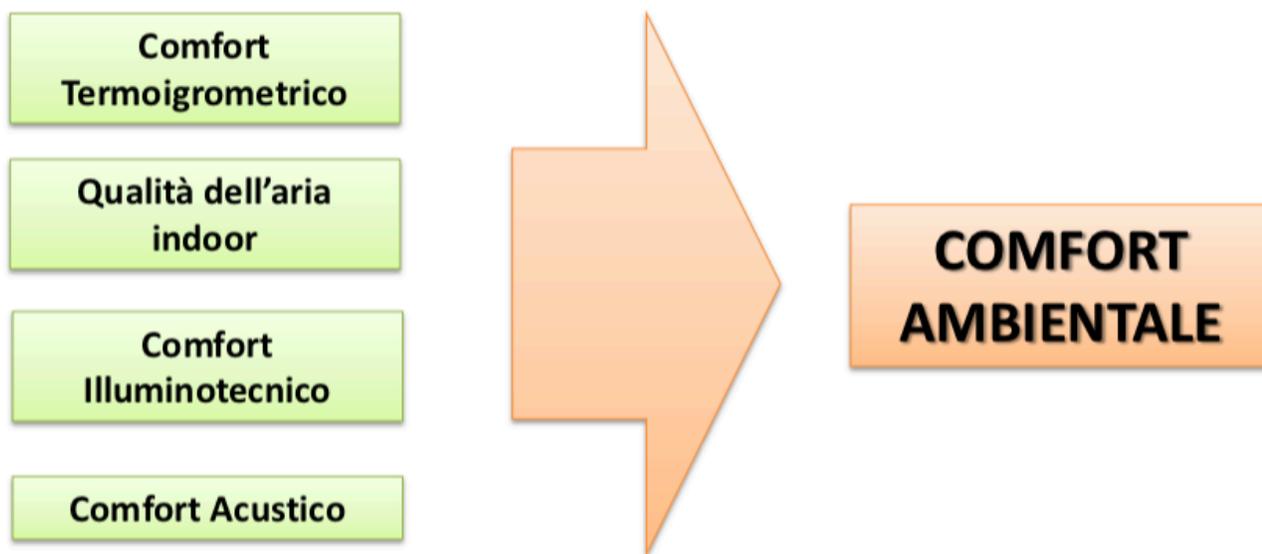


Figura 1: il Comfort ambientale

UNI EN 15251:2008 – Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica

La norma specifica:

- I parametri ambientali interni che influiscono sulla prestazione energetica degli edifici;
- La modalità per definire i parametri di input relativi all'ambiente interno per la progettazione dell'edificio e per il calcolo della prestazione energetica degli edifici;
- I metodi per la valutazione di lungo termine dell'ambiente interno ottenuta, a partire dal calcolo o da risultati di misure;
- I criteri di misurazione che potrebbero essere utilizzati, se necessario per valutare la conformità mediante ispezione;

- i parametri da utilizzare per il monitoraggio e la visualizzazione dell'ambiente interno in edifici esistenti;
- Il modo in cui i diversi criteri relativi all'ambiente interno possono essere utilizzati, anche se non impone particolari criteri da utilizzare.

La norma si applica a: abitazioni, condomini, uffici, scuole, ospedali, alberghi e ristoranti, impianti sportivi, edifici commerciali.

Il Comfort termico può essere valutato secondo più aspetti:

#### APPROCCIO FISIOLOGICO

La valutazione del comfort termico si basa sull'entità degli impulsi che raggiungono l'ipotalamo dai recettori nella pelle. Si ha comfort quando la quantità dei segnali nervosi che raggiungono l'ipotalamo è minima. È uno stato in cui non si manifestano impulsi per correggere l'ambiente con il comportamento.

#### APPROCCIO PSICOLOGICO

Il comfort è una "condizione della mente che esprime soddisfazione nei confronti dello spazio termico"; è di difficile valutazione perché molto legata a condizioni soggettive e ad aspettative individuali.

#### APPROCCIO BASATO SUL BILANCIO TERMICO

Il comfort termico è strettamente legato al bilancio termico della persona che è in grado di stimare il livello di comfort in un certo spazio con una valutazione basata sulla percezione. Diventa necessario considerare tutti gli scambi da e verso la persona. Si può dire che una persona è in condizioni di comfort quando l'energia ricevuta è uguale a quella ceduta.

La percezione termica dipende da:

##### - Parametri ambientali misurabili

Manifestazioni energetiche che esprimono le caratteristiche fisiche e ambientali di uno spazio abitabile, specifici per ciascuno dei sensi (termico, acustico, visivo) e misurabili con unità fisiche (grado centigrado, decibel, lux).

##### - Fattori personali non quantificabili

Condizioni soggettive di natura fisiologica, biologica (età, sesso...), sociologica (tipo di attività, di alimentazione...), psicologica o caratteriale che influiscono sulla valutazione del benessere dell'ambiente.

La letteratura scientifica e alcuni standard tecnici offrono un certo numero di metodi per valutare le condizioni di comfort termico negli edifici valutate su un lungo periodo e indici per predire le condizioni di surriscaldamento estivo dell'ambiente interno.

Tali metodi e indici possono essere strumenti utili sia per la valutazione in esercizio delle condizioni di comfort termico in edifici esistenti, sia per guidare il processo di ottimizzazione del progetto di un nuovo edificio, sia per ottimizzare il funzionamento degli impianti termici.

## Il comfort termico e i Criteri Ambientali Minimi

I Criteri Ambientali Minimi (CAM) definiti dal **Decreto 11 ottobre 2017** prevedono - per gli edifici pubblici di nuova costruzione, in ristrutturazione e manutenzione - l'osservanza di specifici parametri per la valutazione del "comfort termoigrometrico dell'individuo" inteso come "la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico".

Nel dettaglio, "bisogna garantire condizioni conformi almeno alla classe B secondo la norma ISO 7730 in termini di PMV (Voto Medio Previsto) e di PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) [12].

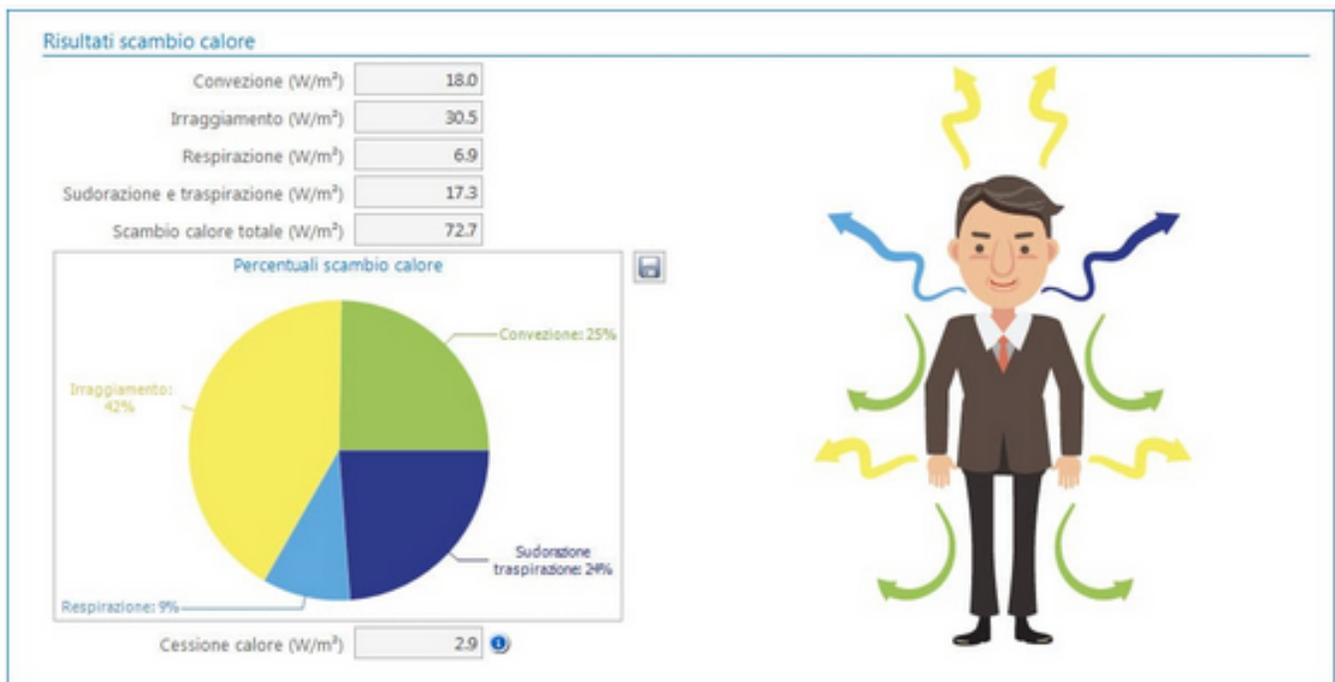


Figura 2: il Comfort termoigrometrico dell'individuo

Calcolo e analisi degli indici di comfort termico PMV e PPD secondo il metodo di Fanger e la UNI EN ISO 7730

Per la valutazione del comfort termoigrometrico esistono diversi modelli basati sia su aspetti fisiologici e comportamentali che su analisi statistiche.

La norma UN EN ISO 7730 - che specifica i modelli di previsione per la sensazione termica di un essere umano all'interno degli ambienti confinati di tipo "moderato" - si basa sul modello di Fanger [8]. Alla base di tale metodologia ci sono i seguenti assunti:

- il corpo umano è un sistema termodinamico che scambia calore e lavoro con l'ambiente esterno
- il comfort termoigrometrico dipende da fattori ambientali (temperatura, umidità, ecc.) e comportamentali (attività, vestiario, ecc.)

Sulla base di questi assunti, con il metodo di Fanger è possibile elaborare indici di benessere termico che esprimono le **condizioni microclimatiche di un ambiente attraverso il giudizio dei soggetti presenti** nell'ambiente termico ed il loro eventuale disagio termico:

La valutazione gli indici più utilizzati sono descritti nella UNI EN ISO 7730 e sono:

- **PMV** (Predicted Mean Vote)
  - **PPD** (Predicted Percentage of Dissatisfied).
- **PMV** (voto medio previsto): cioè il valore medio dei voti previsto in un consistente gruppo di persone, secondo una scala di sensazione termica a 7 punti. Da +3 (molto caldo) a -3 (molto freddo), passando per 0 (né caldo né freddo);
- **PPD** (percentuale prevista di insoddisfatti): percentuale di soggetti termicamente insoddisfatti in uno specifico ambiente. È un indice calcolato a partire dal valore di PMV.

L'indice PMV è adatto alla valutazione di ambienti lavorativi a microclima moderato (ad esempio uffici, laboratori di ricerca, scuole, ospedali, ...).

Il comfort termico si raggiunge per valori di PMV compresi tra + 0,5 e - 0,5, cui corrisponde una percentuale di insoddisfatti delle condizioni termiche (PPD) inferiore al 10%. Inoltre, come indicato nel documento Inail " Microclima e luoghi di lavoro", si possono distinguere, dal punto di vista termico, diverse tipologie di ambiente:

- ambienti moderati, in cui si possono raggiungere condizioni di comfort;
- ambienti severi in cui tali condizioni non possono essere garantite e pertanto ci si deve preoccupare di assicurare la salute e la sicurezza del lavoratore.

Negli ambienti moderati il lavoratore non corre generalmente rischi per la salute ed è possibile raggiungere la condizione di benessere termico, cioè "equilibrio termico tra soggetto ed ambiente ottenuta mediante un'attivazione minima dei meccanismi di termoregolazione per mantenere costante la temperatura corporea intorno ai 37°C".

Si deve inoltre tener conto dei discomfort locali individuati dalla stessa UNI EN ISO 7730. Gli ambienti severi sono ambienti in cui non si possono realizzare condizioni di comfort termico ed è necessario individuare opportune misure di protezione. Possiamo avere:

- ambienti severi caldi: il soggetto "può non riuscire a dissipare calore oltre un certo limite con i meccanismi di termoregolazione (vasodilatazione e sudorazione), con conseguente innalzamento della temperatura centrale. Si va dal deficit idrico, a quello sodico, all'esaurimento della sudorazione, alla sincope da calore e alle ustioni da calore (in caso di esposizione a fonti di calore radiante)".

Per la valutazione è possibile utilizzare l'indice WBGT, che da un'idea immediata sulla eventuale necessità di una valutazione più accurata. Esso tiene conto solo dei parametri ambientali e non dell'attività lavorativa e dell'abbigliamento indossato dal lavoratore. È inoltre possibile utilizzare il modello PHS, un "modello analitico sofisticato che tiene conto anche di fattori complessi, restituendo risultati più affidabili e rendendo la valutazione più veritiera";

- ambienti severi freddi: "il soggetto non riesce, oltre certi limiti, a trattenere calore all'interno del corpo mediante i meccanismi di termoregolazione (vasocostrizione e brivido), con conseguente abbassamento della temperatura centrale. Il raffreddamento globale può portare al rischio di ipotermia fino alla morte per fibrillazione cardiaca, mentre il raffreddamento locale può comportare il rischio di congelamento delle estremità". Per la valutazione si deve tener conto sia del raffreddamento globale (corpo intero) che del raffreddamento locale ovvero di alcune parti specifiche come viso, mani e piedi. Per il raffreddamento globale si utilizza l'indice IREQ (procedura analitica "basata sulla valutazione dell'isolamento dell'abbigliamento richiesto" affinché il corpo sia in equilibrio termico con l'ambiente) e per il raffreddamento locale è applicabile la norma UNI EN ISO 11079 che individua 4 tipi di raffreddamento locale (raffreddamento dovuto al vento freddo, raffreddamento della pelle per contatto con superficie fredde, raffreddamento delle estremità, raffreddamento delle vie respiratorie).

Per quanto riguarda la valutazione del rischio microclimatico, esistono alcune norme tecniche di riferimento.

Per gli ambienti moderati:

-UNI EN ISO 7730:2006 "Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico, mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale": questa norma presenta metodi per prevedere la sensazione termica globale ed il grado di disagio (insoddisfazione termica) delle persone esposte in ambienti termici moderati. Consente infatti la determinazione analitica e l'interpretazione del benessere termico mediante il calcolo del PMV e del PPD e dei criteri di benessere termico locale, fornendo le condizioni ambientali considerate accettabili per il benessere termico globale così come quelle che rappresentano il disagio locale.

Per gli ambienti severi caldi:

-UNI EN ISO 7933:2005 "Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile";

-UNI EN 27243 "Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro)".

Per gli ambienti severi freddi:

-UNI EN 342:2004 "Indumenti di protezione - Completi e capi di abbigliamento per la protezione contro il freddo";

-UNI EN 511:2006 "Guanti di protezione contro il freddo";

-UNI EN ISO 11079:2008 "Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale".

Per tutti i tipi di ambienti:

- UNI EN ISO 7726:2002 "Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche";
- UNI EN ISO 8996:2005 "Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione del metabolismo energetico";
- UNI EN ISO 9886:2004 "Ergonomia - Valutazione degli effetti termici (thermal strain) mediante misurazioni fisiologiche";
- UNI EN ISO 9920:2009 "Ergonomia dell'ambiente termico - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento";
- UNI EN ISO 12894:2002 "Ergonomia degli ambienti termici - Supervisione medica per persone esposte ad ambienti molto caldi o molto freddi".

## Valutazioni del comfort del fabbricato

Il calcolo di questi indici microclimatici ed il loro confronto consente al tecnico di fare una valutazione complessiva dell'ambiente termico interno [14] e di considerare eventuali interventi per migliorare la sensazione di benessere nel caso in cui le condizioni siano peggiori rispetto a quelle limite definite dalla norma.

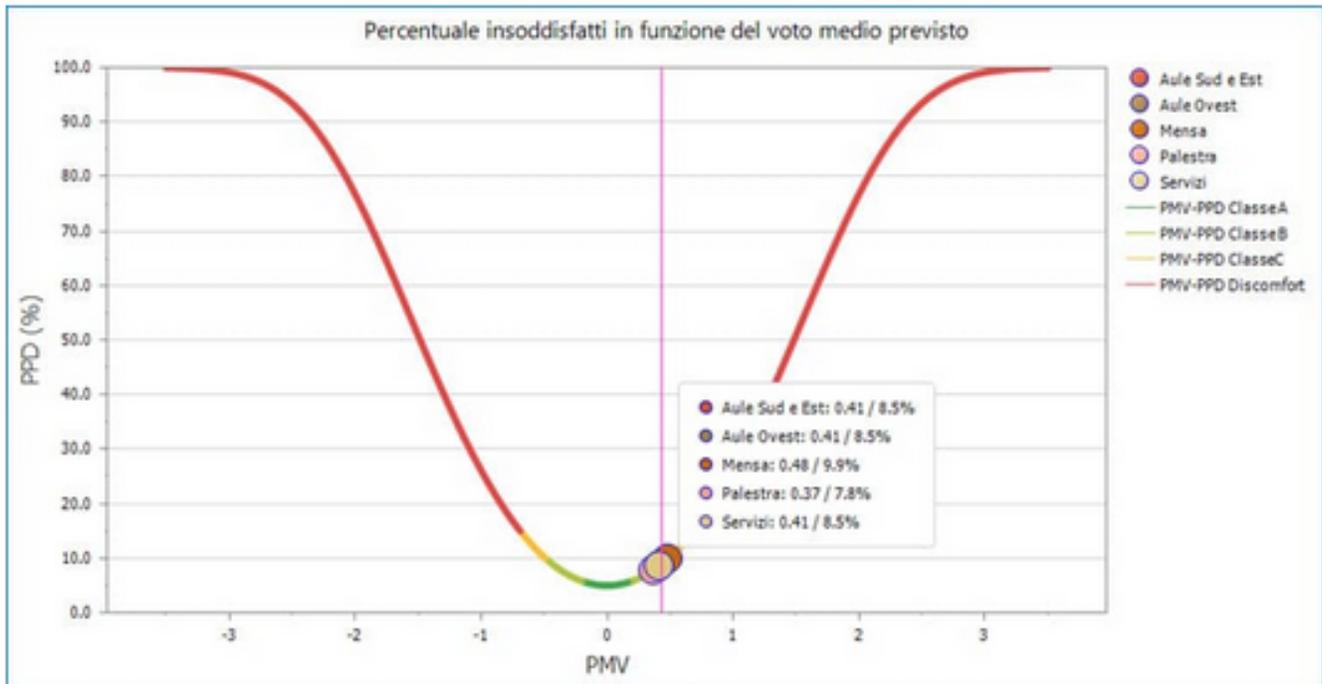


Figura 3: insoddisfatti in funzione del voto medio previsto

Il fabbricato può essere scomposto in uno o più ambienti termici tenendo conto dei seguenti parametri:

- **Grandezze fisico-tecniche caratterizzanti le condizioni ambientali:**
  - temperatura dell'aria
  - umidità relativa dell'aria
  - velocità dell'aria
  - temperatura media radiante
- **Grandezze tipiche del soggetto:**
  - attività svolta
  - abbigliamento

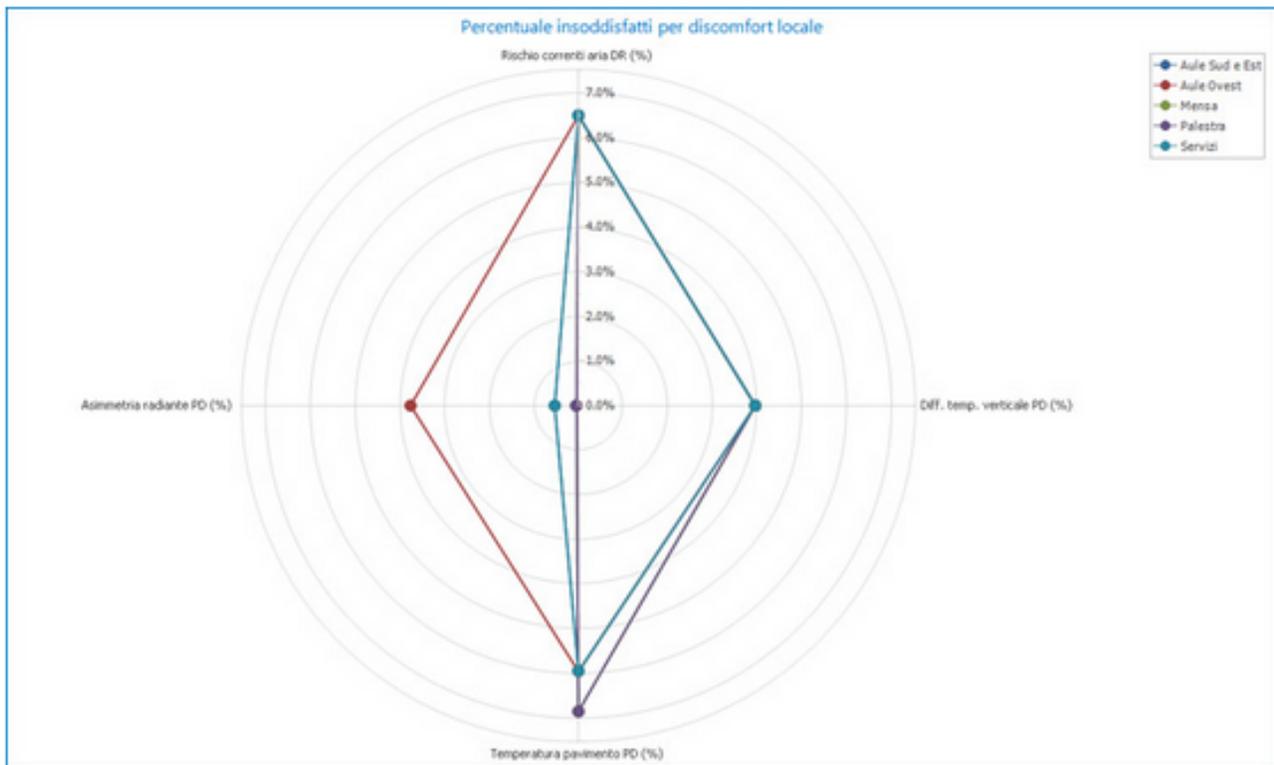


Figura 4: insoddisfatti per il discomfort

## Calcolo del discomfort termico locale

Gli indici PMV e PPD indicano l'impatto dell'ambiente termico sul corpo umano nel suo complesso; tuttavia anche se il PMV prevede una neutralità termica in un ambiente, si può verificare una situazione di "discomfort" dovuta ad un indesiderato riscaldamento o raffreddamento localizzato in qualche parte del corpo (disagio locale). Questo può dipendere da numerosi fattori (o elementi di discomfort) che occorre valutare:

- Corrente d'aria
- Differenza verticale della temperatura dell'aria
- Pavimenti caldi e freddi
- Asimmetria radiante pareti
- Asimmetria radiante soffitto

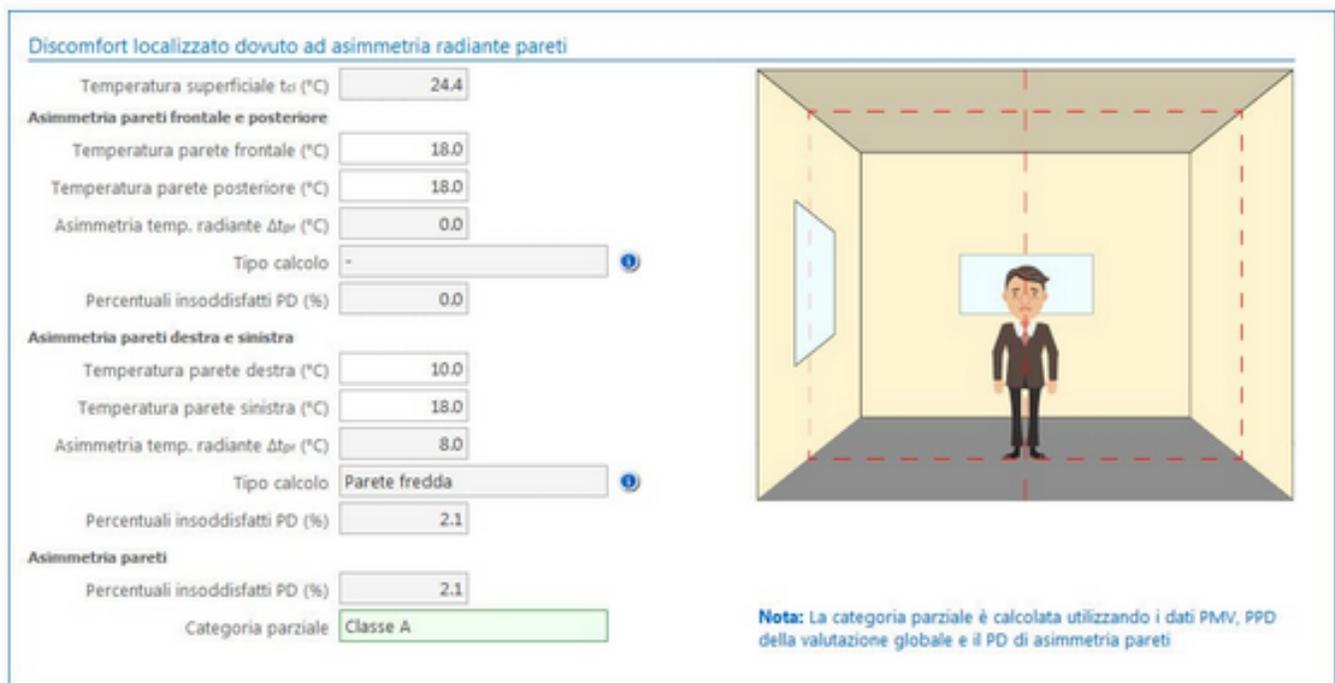


Figura 5: discomfort per asimmetria radiante

## Valutazione globale estiva ed invernale del benessere termico locale e classificazione degli ambienti termici

Oltre la valutazione globale dell'ambiente termico e la valutazione dei disagi locali dell'ambiente termico, si possono prendere in considerazione:

- la gestione e la valutazione estiva e invernale di ogni singolo ambiente termico
- la classificazione dell'ambiente termico in base alla UNI EN ISO 7730
- la classificazione dell'ambiente termico in base alla UNI EN 15251
- il confronto delle valutazioni globali e delle valutazioni locali fra gli ambienti considerati
- la rappresentazione grafica dei risultati
- la classificazione dell'intero fabbricato
- la verifica dei CAM nel caso di edifici pubblici

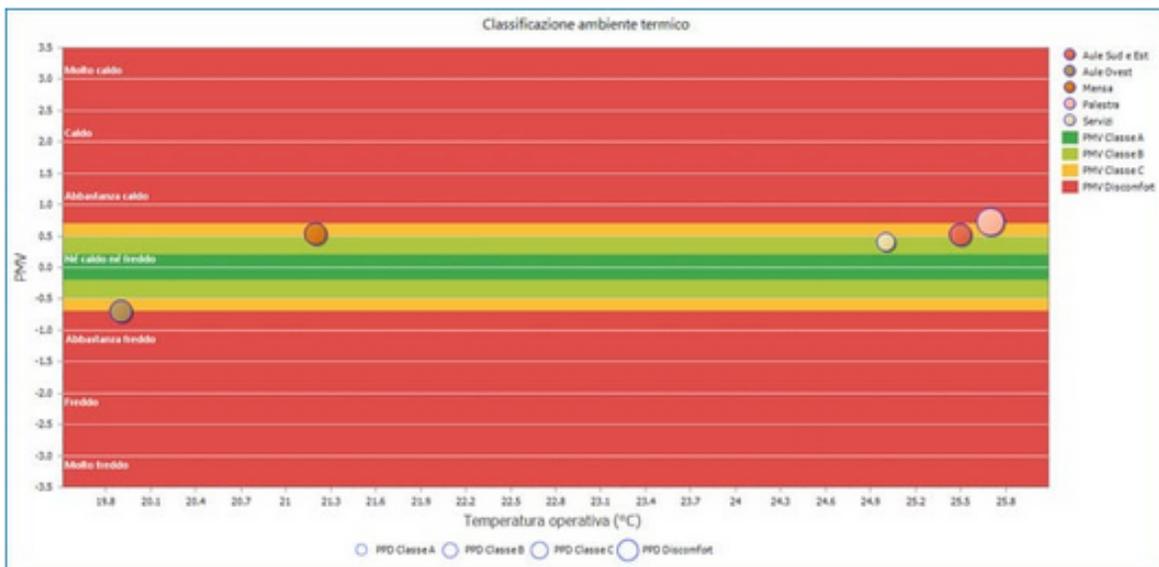


Figura 6: l'ambiente termico - classificazione

## Benessere termoigrometrico e comfort termico

Negli ultimi anni sono state emanate a livello europeo, nazionale e regionale varie leggi e norme relative al risparmio energetico che indicano i criteri per la progettazione di nuove costruzioni o per gli interventi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente.

Intraprendere interventi di risparmio energetico significa consumare meno energia e ridurre le spese di condizionamento e riscaldamento, contribuire alla riduzione del consumo globale di combustibili, contribuire alla riduzione dell'inquinamento, ma anche migliorare le condizioni il **comfort all'interno delle abitazioni**.

**Il risparmio energetico e il comfort degli ambienti vanno di pari passo.**

Nell'ottica di migliorare il comfort interno degli edifici nel rispetto del risparmio energetico si muovono anche i **Criteri Ambientali Minimi (CAM)** del [dm 11 gennaio 2017 "Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l'edilizia e per i prodotti tessili"](#).

In particolare, nell'allegato 2 "*Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*" sono indicati i criteri che consentono di assicurare prestazioni ambientali al di sopra della media.

Tra le specifiche tecniche dell'edificio indicate dai CAM, oltre ai vincoli su diagnosi energetica, prestazione energetica e risparmio idrico sono indicati anche criteri sulla **qualità ambientale interna (comfort)**.

Il benessere termo-igrometrico dell'individuo può essere definito come "*la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico*" [UNI ISO EN 7730]; coincide con lo stato in cui il **sogetto non sente caldo né freddo**.

La sensazione di benessere è diversa da soggetto a soggetto e dipende da fattori quali:

- il metabolismo
- la temperatura
- il sesso
- il vestiario
- l'età
- l'attività che sta svolgendo
- ecc.

Alcuni sono **parametri ambientali misurabili** e altri **fattori personali non quantificabili**.

Nonostante il grande numero di parametri che la possono influenzare, alla base della sensazione termica del corpo umano c'è la **temperatura degli organi interni** che si attesta, in individui sani, sui 37° C, con una variazione di circa mezzo grado centigrado.

Infatti, vista la necessità di mantenere costante la temperatura interna, l'ipotalamo attiva il sistema di termoregolazione che è essenzialmente di due tipi:

- vasomotorio
- comportamentale

In base all'ambiente caldo o freddo, l'ipotalamo effettua una dilatazione o costrizione dei vasi sanguigni per aumentare o ridurre l'afflusso di sangue alla periferia. Se questo non bastasse, l'ipotalamo passerà alla termoregolazione comportamentale: sudorazione e riduzione dell'attività fisica oppure brividi e posizioni del corpo rannicchiate.

### Modelli di comfort termico

Per la valutazione del comfort termo-igrometrico esistono diversi modelli basati sia su aspetti fisiologici e comportamentali, sia su analisi statistiche, in modo da coprire anche le diverse sensibilità dei soggetti.

Per quanto riguarda IL COMFORT TERMICO la norma UNI EN 15251 utilizza due modelli:

#### COMFORT SECONDO FANGER

- da usarsi in presenza di un sistema di condizionamento o raffrescamento di tipo attivo (meccanico, termoelettrico, ecc.);
- deriva dalla teoria dei bilanci termici applicati al corpo umano e da studi statistici condotti in laboratorio;
- è stato sviluppato a partire dagli anni '60;
- è lo standard attualmente "predominante" e a cui si rifanno le principali norme in materia.

#### COMFORT ADATTIVO

- dedicato agli edifici sprovvisti di un impianto di raffrescamento meccanico (ma per questa tipologia di edifici può anche essere utilizzato il modello di Fanger)
- deriva da una serie di studi statistici condotti in edifici reali;
- si è osservato che molto spesso le persone sono più tolleranti di quanto suggerisce il modello di Fanger;
- permette di ottenere comfort a costi energetici molto inferiori;
- Il nuovo standard europeo introduce questo modello per gli edifici raffrescati naturalmente.

## IL sistema di termoregolazione

Il modello di Fanger è stato sviluppato negli anni '60 ed è lo standard principale a cui si rifanno le principali norme. Deriva da studi statistici condotti in laboratorio e dalla teoria dei bilanci termici applicati al corpo umano. È applicato ad ambienti condizionati meccanicamente.

Il modello adattivo è più recente e deriva da studi statistici condotti in edifici reali. È meno restrittivo sulla soddisfazione termica del soggetto rispetto al modello Fanger e permette di ottenere comfort a costi energetici inferiori. È applicato ad ambienti senza condizionamento meccanico.

Sul modello di Fanger è basata la norma UNI EN ISO 7730, norma indicata nei CAM per la valutazione del comfort termo-igrometrico.

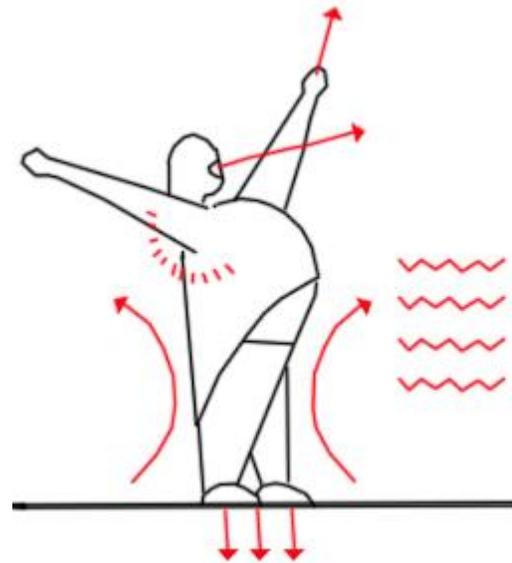


Figura 7: Omotermità dell'organismo umano

Per analizzare le condizioni di benessere occorre partire dalla necessità di OMOTERMIA dell'organismo umano, cioè un meccanismo che ha funzione di regolare la risposta fisiologica in relazione alle sollecitazioni ambientali, attraverso sistemi di regolazione finalizzati ad adattarsi il più possibile alle condizioni dell'ambiente circostante, in modo da mantenere costante la temperatura del corpo.

Condizioni di benessere per il corpo umano:

$$T_{corporea} = 37 \pm 0.5 \text{ } ^\circ$$

Affinché tale condizione sia sempre rispettata, l'organismo attiva, al variare dello stimolo esterno, un SISTEMA DI TERMOREGOLAZIONE molto efficace. Tale sistema ha come sensori una serie di termoricettori, che sono delle cellule poste sia all'interno del corpo sia sulla superficie della pelle.

Il sistema di regolazione è un sistema integrato che confronta istante per istante le temperature di riferimento con le informazioni inviate dai termoricettori. Ogni qualvolta si verifica uno squilibrio, vengono attivati i sistemi effettori per procedere alla regolazione.

## Confort termico per il corpo umano nel suo complesso

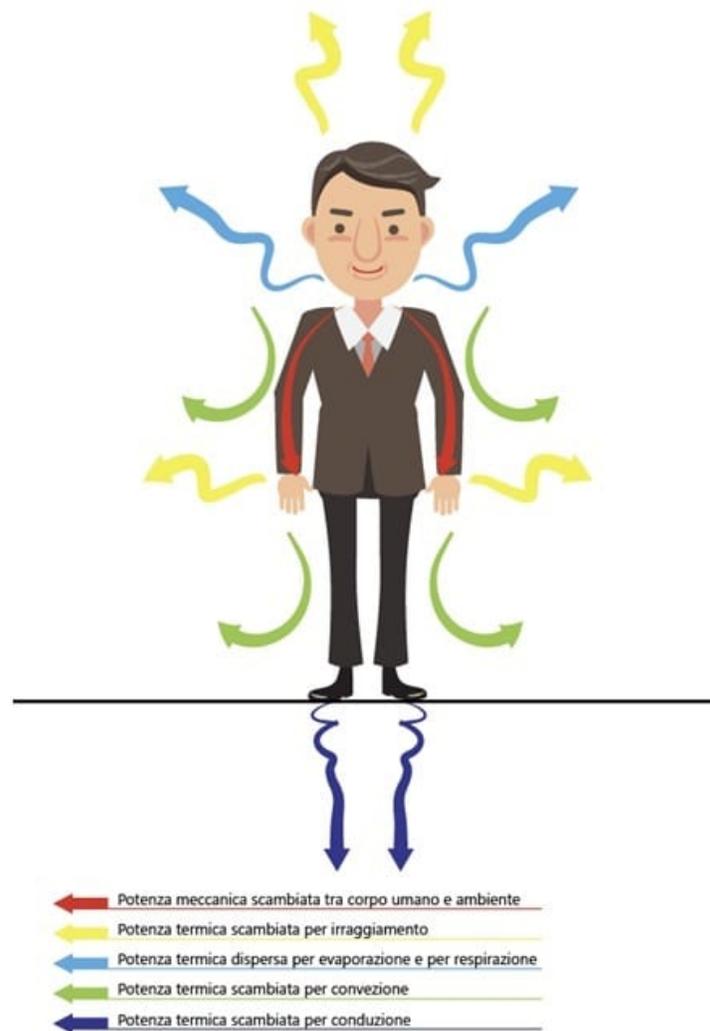


Figura 8: potenza termica scambiata dal corpo umano

Il corpo umano è un sistema termodinamico che scambia calore e lavoro con l'ambiente esterno. La seguente equazione descrive il bilancio termico tra corpo umano e ambiente:

$$S = M - W - E - E_{res} - C_{res} - C - R - K$$

dove:

- $S$  è la variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo (potenza acquisita o ceduta)
- $M$  è la potenza generata dall'attività metabolica
- $W$  è la potenza meccanica scambiata tra corpo umano e ambiente
- $E$  è la potenza termica dispersa per evaporazione attraverso la pelle
- $E_{res}$  è potenza termica ceduta all'ambiente nella respirazione come calore latente
- $C_{res}$  è la potenza termica ceduta all'ambiente nella respirazione come calore sensibile
- $C$  è la potenza termica scambiata per convezione
- $R$  è la potenza termica scambiata per irraggiamento
- $K$  è la potenza termica scambiata per conduzione

Dall'analisi sinteticamente effettuata dei diversi termini del bilancio termico sul corpo umano, si evince che alla determinazione dello stato termico del corpo umano contribuiscono quattro parametri fisici dell'ambiente:

1. temperatura dell'aria,  $t_a$
2. velocità dell'aria,  $v_a$
3. temperatura media radiante,  $t_r$
4. grado igrometrico o umidità relativa,  $\Phi$ ,

e due grandezze relative al soggetto:

1. attività svolta, ovvero il metabolismo energetico,  $M$
2. resistenza termica dell'abbigliamento,  $I_{cl}$

L'insieme di queste sei variabili viene generalmente chiamato ambiente termico.

## Comfort termico e indici di benessere per ambienti moderati

Negli ambienti moderati si valuta lo scostamento delle condizioni reali da quelle di benessere attraverso opportuni indici di comfort globale che esprimono la risposta media di un grande numero di soggetti.

Anche in questo caso, l'indice attualmente più adottato è il PMV (dall'inglese Predicted Mean Vote, Voto Medio Previsto), proposto da Fanger ed adottato dalla norma UNI-EN-ISO 7730, che è funzione delle sei variabili indipendenti dalle quali dipendono i termini del bilancio termico e che è definito sulla scala a 7 valori riportata nella tabella seguente.

VOTO	Sensazione termica soggettiva
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Confortevole – neutralità
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Figura 9: votazione della sensazione termica

$$PMV = f(M, I_{cl}, t_a, t_r, v_a, \Phi)$$

Il PMV è la sensazione termica avvertita in un dato ambiente da un individuo dotato di media sensibilità.

La norma UNI EN ISO 7730 per individuare un **ambiente in Classe A** richiede un **PMV compreso tra -0,2 < PMV < +0,2**.

Per un ambiente in Classe B prevede un PMV tra -0,5 < PMV < 0,5 e per un ambiente in Classe C un PMV tra -0,7 < PMV < +0,7.

Il PMV prevede il valore medio dei voti di sensazione termica espressi da un gran numero di persone esposte allo stesso ambiente; i voti individuali sono quindi dispersi intorno a questo valore medio.

Per prevedere il numero di persone che hanno una sensazione non confortevole di caldo o di freddo è possibile calcolare la percentuale prevista di insoddisfatti (PPD).

Il PPD è funzione del PMV, come mostrato nel grafico sotto.

Statisticamente anche con PMV prossimi allo zero si avrà una piccola percentuale di insoddisfatti. Per PMV pari a zero ci sarà circa il 5% di soggetti insoddisfatti.

La UNI EN ISO 7730 prescrive un PPD massimo del 10%, ai limiti dell'intervallo di benessere, con PMV tra  $-0,5 < PMV < 0,5$  che corrisponde alla Classe B.

I CAM (criteri ambientali minimi), indicano che “bisogna garantire condizioni conformi almeno alla classe B secondo la norma ISO 7730:2005 in termini di PMV (Voto Medio Previsto) e di PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti)”. Inoltre “bisogna garantire la conformità ai requisiti previsti nella UNI EN 13788 ai sensi del DM 26 giugno 2015 anche in riferimento a tutti i ponti termici”.

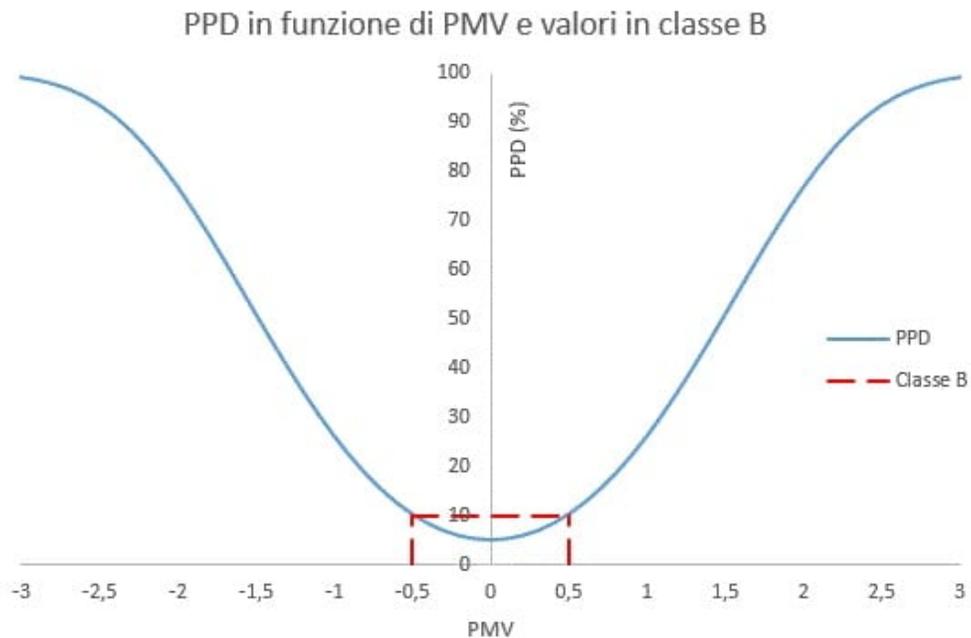


Figura 10: PPD in finzione del PMV

La UNI EN ISO 7730 per il calcolo del PMV, oltre al metodo analitico, fornisce un metodo tabellare che parte dalla conoscenza della temperatura operativa.

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

Considerando l'approccio statistico nella definizione dell'indice PMV ci si rende conto come tale indice esprima il VOTO MEDIO espresso nei confronti del microclima dalla maggioranza dei soggetti, ma è chiaro che individualmente i singoli giudizi si disperdano intorno a tale valore. Al fine di prevedere il numero delle persone che comunque non saranno soddisfatte dal microclima, Fanger elaborò l'indice PPD, definito tramite una correlazione che lo lega al PMV:

$$PPD = 100 - 0.95 \cdot e^{(-0.03353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)}$$

Legenda

- X Voto medio previsto
- Y Percentuale prevista di insoddisfatti in %

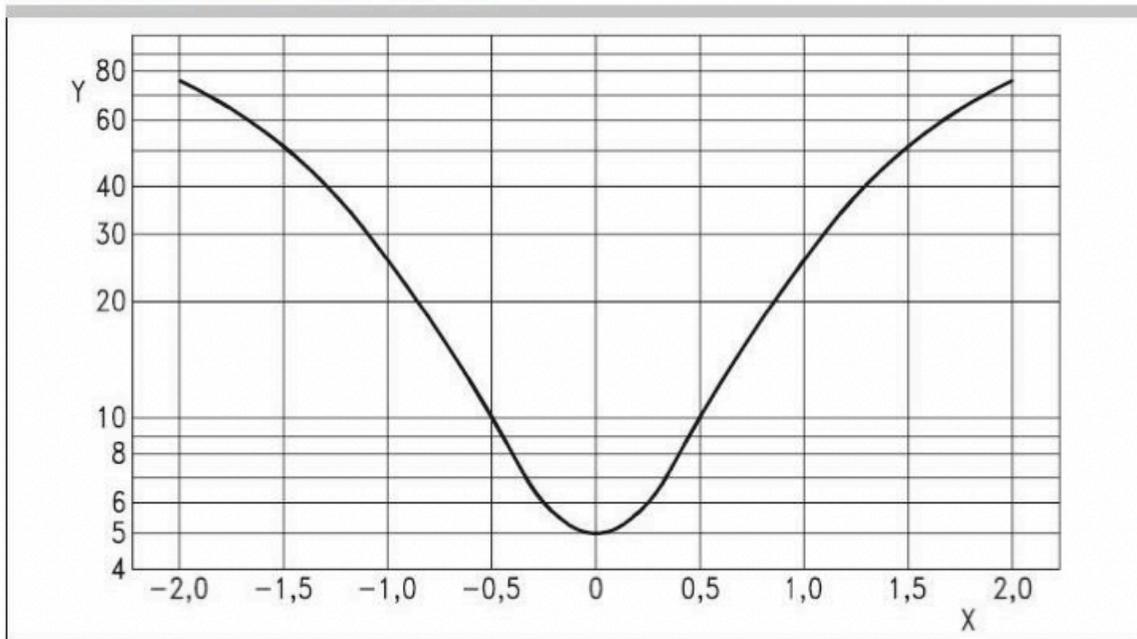


Figura 11: voto medio previsto in funzione degli insoddisfatti

In tal modo è stato ottenuto il diagramma riportato in figura il quale mostra come, anche per PMV = 0, risulti PPD = 5%, non esistono condizioni ambientali che possano soddisfare il 100% delle persone. Il massimo ottenibile su base statistica è, quindi, il soddisfacimento del 95% delle persone.

## Discomfort termico locale

Il PMV e il PPD esprimono il confort termico per il corpo umano nel suo complesso. Tuttavia l'insoddisfazione termica può essere causata anche da un disagio termico di una parte del corpo. Ad esempio le correnti d'aria possono creare disagi a livello del collo o i pavimenti freddi un disagio a livello dei piedi.

Nella UNI EN ISO 7730 sono indicati i seguenti Discomfort locali:

- Corrente d'aria
- Differenza verticale della temperatura dell'aria
- Pavimenti caldi o freddi
- Asimmetria radiante



La UNI EN ISO 7730 aggrega il confort globale con il confort locale e estrapola le seguenti categorie di classificazione dell'ambiente:

Categoria	Stato termico complessivo		Discomfort termico locale			
	PPD (%)	PMV	Corrente d'aria DR (%)	Differenza temp. verticale PD (%)	Pavimenti caldi o freddi PD (%)	Asimmetria radiante PD (%)
Classe A	<6	$-0,2 < PMV < +0,2$	<10	<3	<10	<5
Classe B	<10	$-0,5 < PMV < +0,5$	<20	<5	<10	<5
Classe C	<15	$-0,7 < PMV < +0,7$	<30	<10	<15	<10

Nei paragrafi seguenti sono descritti i vari discomfort locali.

## Discomfort per corrente d'aria

Il modello per la determinazione della percentuale di insoddisfatti per correnti d'aria presente nella UNI EN ISO 7730 si applica a persone che svolgono attività leggera, soprattutto sedentaria con sensazione

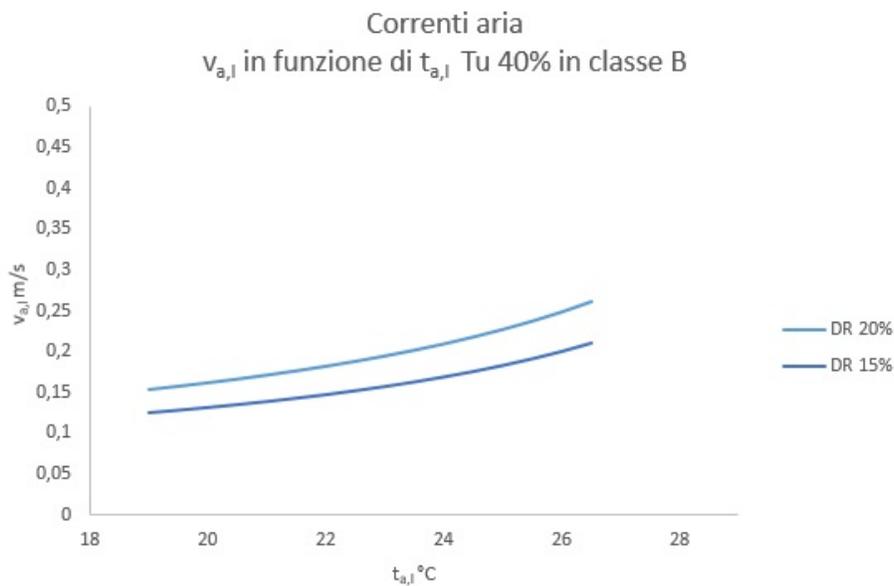
termica globale prossima alla neutralità. Il disagio per correnti d'aria è minore per attività a metabolismo energetico più alto della sedentarietà e per soggetti che avvertono una sensazione di caldo piuttosto che di neutralità.

Il disagio dipende dalla temperatura dell'aria, dalla velocità media dell'aria e dall'intensità della turbolenza.

Questo modello prevede bene il rischio da corrente d'aria al collo invece, potrebbe sovrastimare la previsione di disagio per braccia e piedi.

La UNI EN ISO 7730 propone per la Classe B una percentuale di insoddisfatti minore del 20%.

**Figura 12: il disagio per le correnti d'aria**



**Figura 13: insoddisfatti per correnti d'aria in funzione della temperatura**

## Discomfort per differenza verticale della temperatura dell'aria

Il modello per la determinazione della percentuale di insoddisfatti per differenza verticale di temperatura dell'aria presente nella UNI EN ISO 7730 è valido per differenze di temperatura tra testa e piedi inferiori agli 8°C.

All'aumentare della differenza di temperatura aumenta in maniera non lineare anche la percentuale di insoddisfatti.

La UNI EN ISO 7730 propone come limite un gradiente di 3°C/m (Classe B) che corrisponde ad una percentuale di insoddisfatti minore del 5%.



Figura 14: discomfort per differenza verticale di temperatura

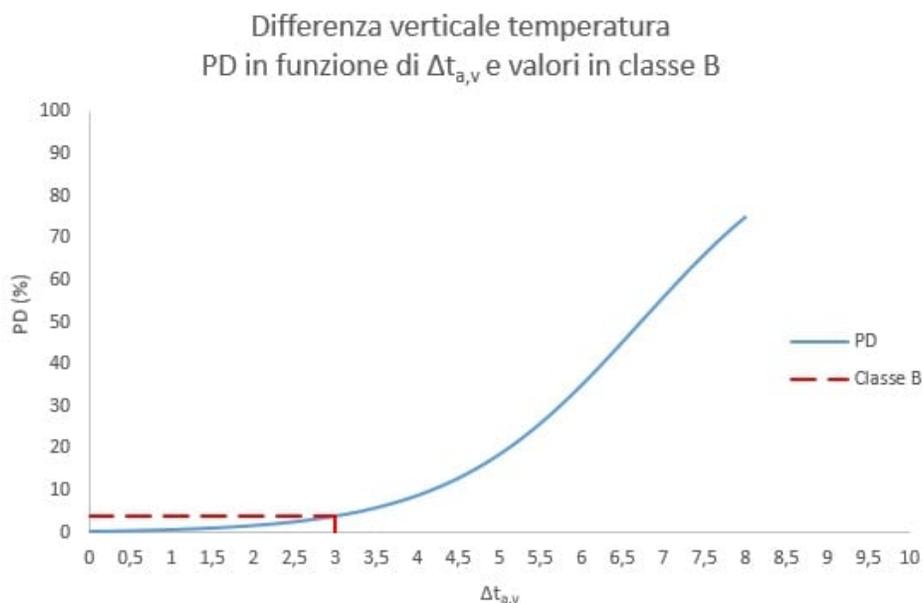


Figura 15: insoddisfatti in funzione della differenza verticale di temperatura

## Discomfort per pavimenti caldi o freddi

Questo disagio è causato dallo scambio termico tra corpo e pavimento attraverso i piedi. I fattori che lo influenzano sono la temperatura del pavimento, la conducibilità termica e la capacità termica del materiale da cui è rivestito il pavimento, il tipo di calzature indossate e il tempo trascorso.

Il modello per la determinazione della percentuale di insoddisfatti per pavimenti caldi e freddi presente nella UNI EN ISO 7730 è stato ricavato da studi su persone in piedi e/o in stato sedentario con calzature.

In soggetti che indossando calzature, anche leggere, e che si trovano in stato di neutralità termica il benessere dipende principalmente dalla temperatura più che dal materiale da cui il pavimento è ricoperto.

I limiti di temperatura proposti dalla UNI EN ISO 7730, in inverno, vanno tra 19°C e 29°C (Classe B) che corrispondono ad una percentuale di insoddisfatti minore del 10%. Per la stagione estiva non esistono limiti.

Per i soggetti che si muovono a piedi nudi i limiti di temperatura del pavimento sono leggermente differenti: in questo caso è necessario riferirsi alla ISO/TS 13732-2 (Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces — Part 2: Human contact with surfaces at moderate temperature) [7].

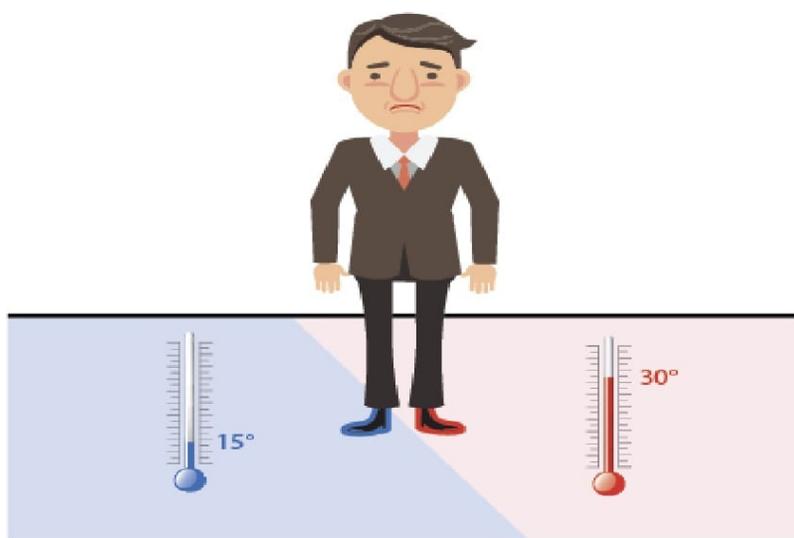
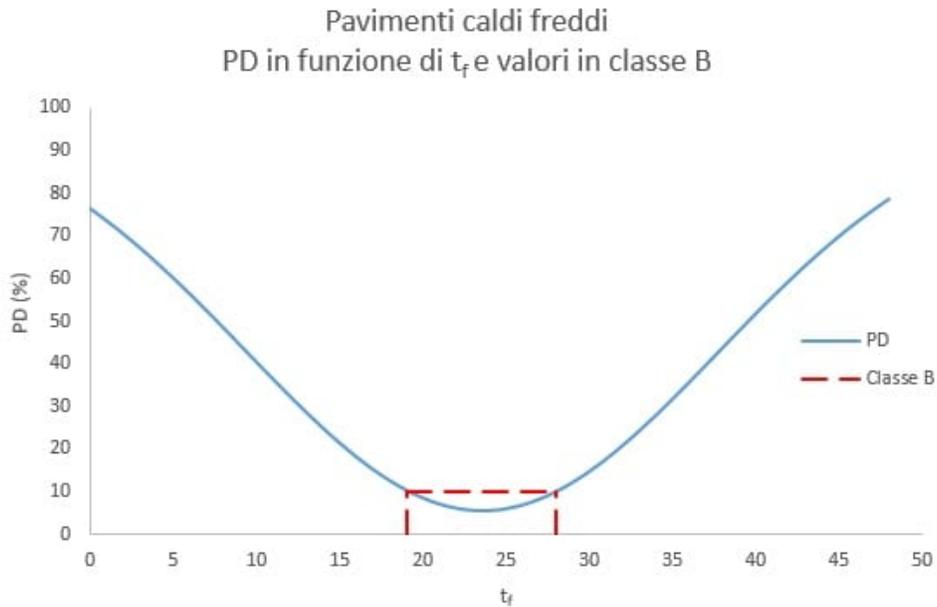


Figura 16: discomfort per pavimenti caldi/freddi



**Figura 17: insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento**

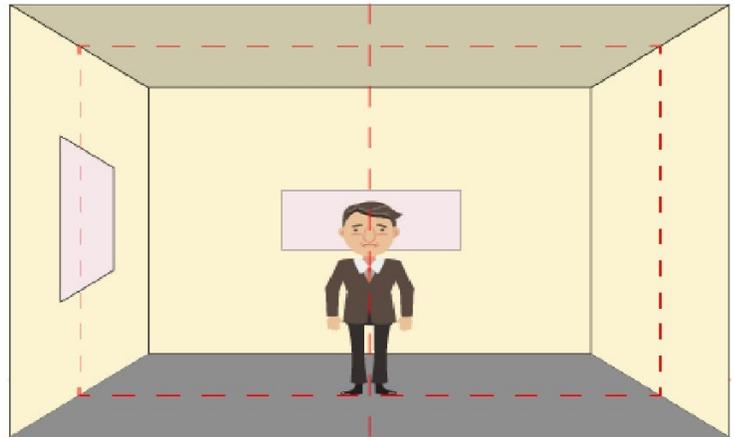
### Discomfort per asimmetria radiante

Il disagio per asimmetria radiante può derivare dalla presenza di superfici con temperatura differente da quella ambientale come ad esempio vetrate, pareti non isolate, macchinari, pannelli caldi o freddi su pareti o soffitto.

La UNI EN ISO 7730 propone quattro modelli per coprire tutti i casi di discomfort da asimmetria radiante:

- Soffitto caldo, valido per temperatura radiante asimmetrica <23°C
- Parete fredda, valido per temperatura radiante asimmetrica <15°C
- Soffitto freddo, valido per temperatura radiante asimmetrica <15°C
- Parete calda, valido per temperatura radiante asimmetrica <35°C

Questi modelli dipendono esclusivamente dal valore della temperatura radiante asimmetrica che è definita come la differenza tra la temperatura radiante planare di due superfici opposte. La temperatura radiante planare è la temperatura proveniente dalla direzione perpendicolare alla superficie di misura.



La UNI EN ISO 7730 propone per la Classe B una percentuale di insoddisfatti minore del 5%.

Figura 18: discomfort per asimmetria radiante

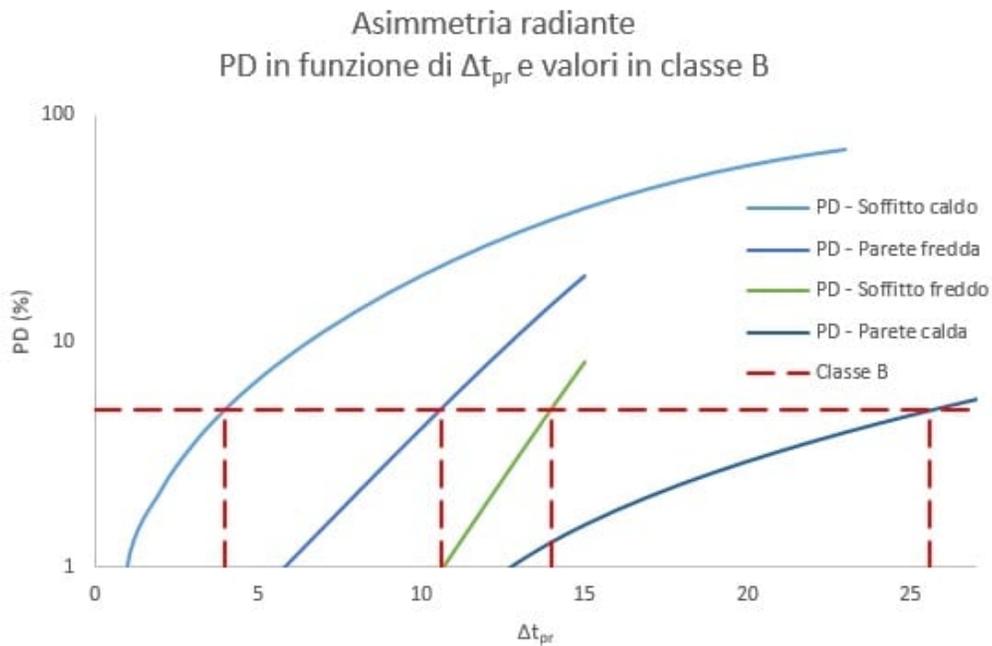


Figura 19: insoddisfatti in funzione dell'asimmetria radiante

## Condizioni di benessere stagionali

Dalle indicazioni della UNI EN ISO 7730, per soggetti in stato sedentario e/o in attività leggera, è possibile estrapolare le seguenti condizioni di benessere valide per il periodo invernale ed estivo in cui è attivo il sistema di climatizzazione:

Variabile	Periodo invernale	Periodo estivo
Temperatura operativa	20 – 24 °C	23 – 26 °C
Differenza verticale di temperatura (tra 1,1m e 0,1 m dal pavimento)	< 3 °C	< 3 °C
Temperatura superficiale del pavimento	19 – 26 °C (29 °C per riscaldamento a pavimento)	–
Asimmetria temperatura radiante pareti	< 10 °C	–
Asimmetria temperatura radiante soffitto	< 5 °C	–
Umidità relativa	30 – 70 %	30 – 70 %
Velocità aria (ad es. per DR 15% da grafico precedente)	0,15 m/s (22 °C)	0,17 m/s (24 °C)

Nella porzione di diagramma psicrometrico seguente vengono mostrate le due condizioni stagionali precedenti con: temperatura operativa uguale a temperatura a bulbo secco, metabolismo di un soggetto in attività sedentaria ( $M < 1,2$  met), vestito in maniera leggera (in estate  $I_{cl} = 0,5$  clo, in inverno  $I_{cl} = 0,9$  clo).

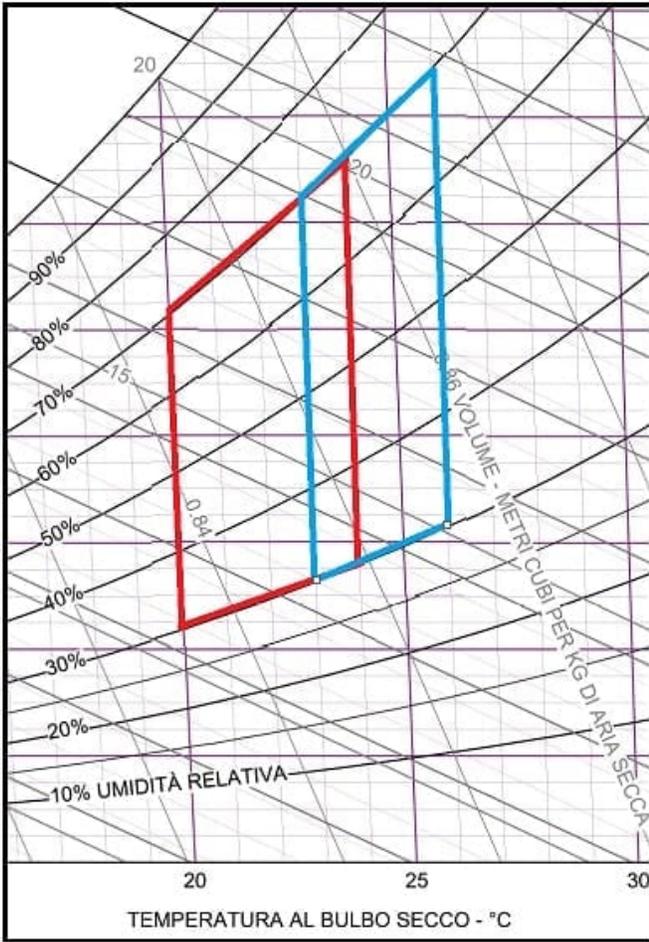


Figura 20: temperatura al bulbo secco

## Il Benessere Termoigrometrico

Per BENESSERE TERMOIGROMETRICO si intende la particolare condizione psicologica di soddisfazione da parte del soggetto nei confronti del microclima.

I parametri che influenzano le condizioni di benessere termoigrometrico sono:

- PARAMETRI AMBIENTALI: che influiscono sui sistemi di regolazione:

- Temperatura dell'aria che circonda il corpo, influisce sulla cessione di calore per convezione e per respirazione;
- Temperatura media radiante, media ponderata delle temperature delle superfici che racchiudono il corpo, influisce sugli scambi per irraggiamento;
- Umidità relativa dell'aria, influisce sulle perdite per evaporazione da traspirazione e l'umidità ceduta attraverso la respirazione;
- Velocità dell'aria rispetto al corpo, influisce sulla dissipazione per convezione e nella velocità di evaporazione per traspirazione;
- Grado di attività, che influisce direttamente sul metabolismo;
- Tipo di vestiario, che influisce sul passaggio di calore e dell'umidità.

La individuazione delle condizioni di benessere in relazione alle condizioni ambientali può essere eseguita partendo dalle seguenti considerazioni (Fanger 1970):

- L'organismo reagisce agli stimoli termici con un sistema di termoregolazione capace di mantenere costante la sua temperatura corporea e ciò significa porre nell'equazione di bilancio  $S=0$
- Le condizioni di omeotermia sono però soltanto una condizione necessaria ma non sufficiente per raggiungere il benessere, poiché l'individuo può avvertire una sensazione di caldo o di freddo pur trovandosi in equilibrio termico.
- Studi sperimentali condotti da Fanger su un campione di individui hanno messo in luce, che le grandezze fisiologiche che rappresentano meglio il livello di sensazione termica del soggetto, sono la temperatura della pelle e la quantità di calore scambiato per sudorazione
- Da questi studi è emerso che, a differenza di quello che si credeva precedentemente, l'uomo, all'aumentare dell'attività, accetta una certa sudorazione, mentre preferisce non sudare solamente quando svolge attività sedentarie; al tempo stesso per le attività più intense è preferita una temperatura della pelle più bassa rispetto a quella che si ha per le attività sedentarie.

Fanger ha posto l'equazione di bilancio energetico in una forma più utile correlando i singoli termini fisiologici ai parametri termofisici del corpo umano. In base al bilancio termoigrometrico del corpo umano, è stata elaborata la seguente equazione del benessere in relazione alle grandezze individuate come significative.

$$f(M, \eta, I_{cl}, t_{mr}, t_a, i_a, w_a, t_s, E_t) = 0$$

Nell'equazione di bilancio ottenuta (non riportata in forma estesa) compaiono esplicitamente le seguenti grandezze:

- grandezze fisico-tecniche caratterizzanti le condizioni ambientali:
  - temperatura ambiente,  $t_a$  (°C);
  - umidità relativa dell'aria,  $i_a$ ;
  - velocità dell'aria,  $w_a$  (m/s);
  - temperatura media radiante,  $t_{mr}$  (°C);
- grandezze tipiche del soggetto:
  - attività svolta:  $M, \eta$  (rendimento meccanico);
  - abbigliamento,  $I_{cl}$ ;
- grandezze governate dal sistema di termoregolazione fisiologico:
  - temperatura medio della pelle,  $t_s$  ;
  - potenza termica dispersa per traspirazione,  $E_t$

L'equazione del benessere di Fanger può essere risolta (anche in forma grafica) rispetto ad una qualunque delle sei variabili e consente di valutare le condizioni di benessere termico in un ambiente.

Il diagramma in Figura (per un assegnato livello di attività e di resistenza termica dell'abbigliamento) valuta le condizioni di benessere al variare di:

- ✓ umidità relativa,
- ✓ la velocità dell'aria,

- ✓ la temperatura dell'aria (supposta pari alla temperatura media radiante).

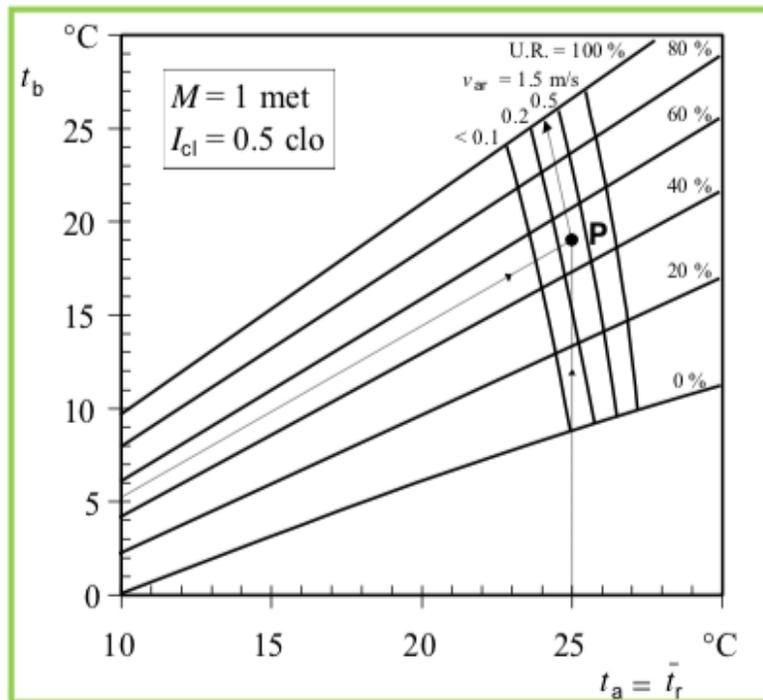


Figura 21: Correlazioni tra temperatura esterna, velocità relativa dell'aria e umidità relativa

Correlazioni tra temperatura esterna, assunta pari alla temperatura media radiante, velocità relativa dell'aria e umidità relativa. Il grafico si riferisce a un livello metabolico di 1 met, una resistenza termica dei vestiti di 0.5 clo.

- Per esempio, ipotizzando un ambiente caratterizzato da una umidità relativa del 50%, temperatura media radiante e dell'aria di  $25^{\circ}\text{C}$  (punto P), ai fini del comfort termico è richiesta una velocità dell'aria di circa 0.35 m/s.

Il diagramma in Figura (per un assegnato livello di attività, di resistenza termica dell'abbigliamento e di umidità relativa) invece valuta le condizioni di benessere al variare di:

- ✓ la velocità dell'aria,
- ✓ la temperatura dell'aria,
- ✓ la temperatura media radiante.

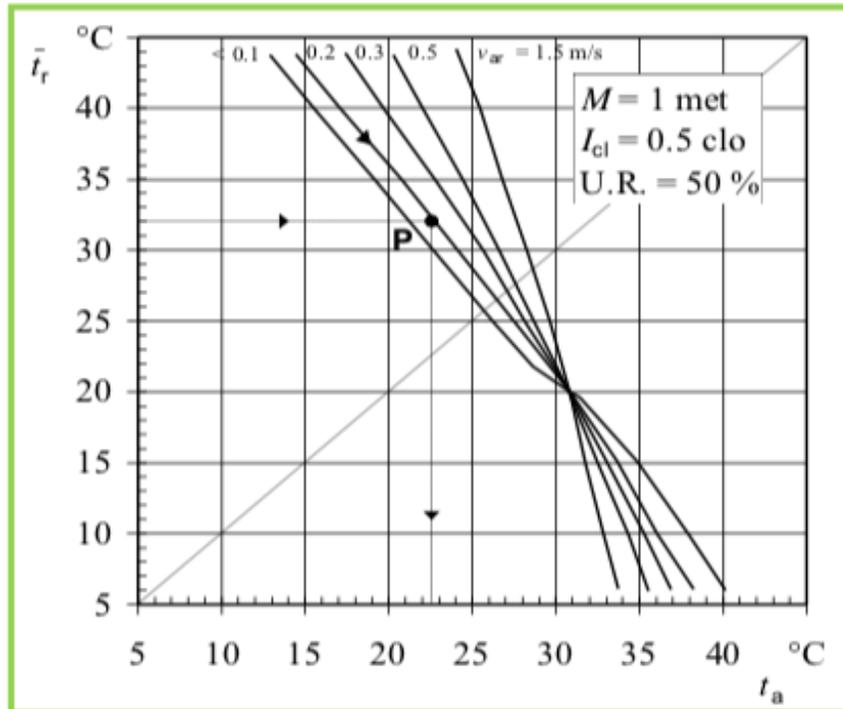


Figura 22: correlazioni tra temperatura dell'aria, temperatura media radiante e velocità dell'aria

Il grafico si riferisce a un livello metabolico di 1 met, una resistenza termica dei vestiti di 0.5 clo e una umidità relativa del 50%.

- Per esempio, ipotizzando un ambiente caratterizzato da una temperatura media radiante di 32°C e una velocità dell'aria di 0.2 m/s (punto P), ai fini del comfort termico è richiesta una temperatura dell'aria di circa 22.5 °C

Infine il seguente diagramma (per un assegnato livello di attività, di resistenza termica dell'abbigliamento e dell'umidità relativa) valuta le condizioni di benessere al variare di:

- ✓ la velocità dell'aria
- ✓ la temperatura dell'aria (supposta pari alla temperatura media radiante)

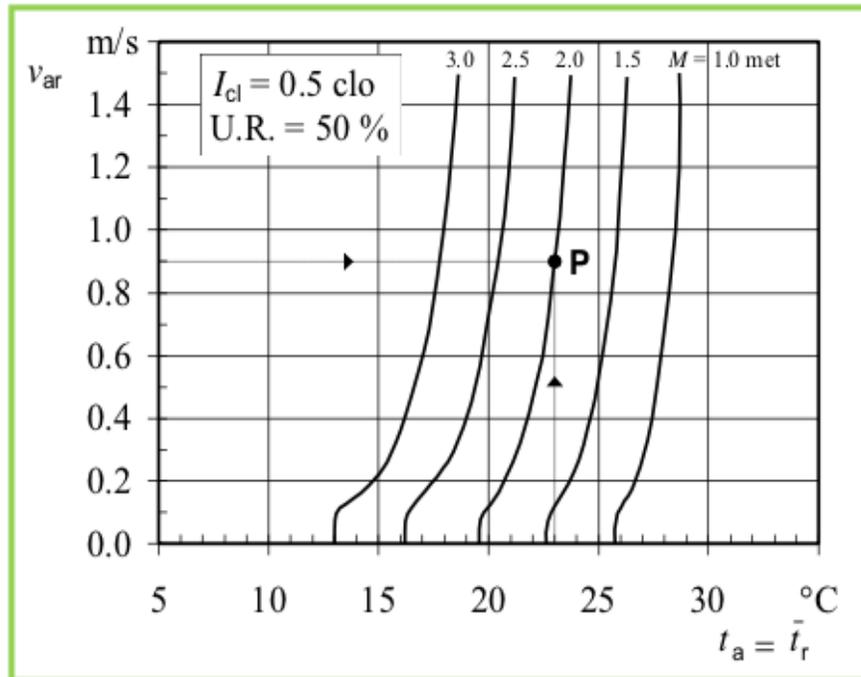


Figura 23: Correlazioni tra temperatura dell'aria, velocità relativa dell'aria e attività svolta

Il grafico si riferisce a una resistenza termica dei vestiti di 0.5 clo e una umidità relativa del 50%.

- Per esempio, ipotizzando un ambiente caratterizzato da una temperatura dell'aria uguale a una temperatura media radiante di  $23^\circ\text{C}$  e una velocità dell'aria di 0.9 m/s (punto P), ai fini del comfort termico è richiesta una attività metabolica di 2 met

Le condizioni di benessere all'interno di un ambiente, sono determinate per una data attività e per un certo abbigliamento, da valori delle quattro grandezze microclimatiche ambientali tali che sia soddisfatta l'equazione di benessere.

Dato un certo ambiente all'interno del quale si svolge una certa attività nasce pertanto il problema di valutare il microclima e cioè di stabilire se sono verificate le condizioni di benessere ed eventualmente individuare lo scostamento da tali condizioni.

Mettendo in relazione con il carico termico i dati sperimentali di sensazione di circa 1300 persone posti in ambiente le cui variabili microclimatiche potevano essere controllate, Fanger elaborò l'equazione che definisce l'indice PMV.

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} = & (0,303 e^{-0,036 M} + 0,028) \{ (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \times [5\,733 - 6,99 (M - W) \\
 & - p_a] - 0,42 \times [(M - W) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} M (5\,867 - p_a) - 0,001\,4 M (34 - t_a) \\
 & - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \}
 \end{aligned}$$

dove:

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

$$h_c = \begin{cases} 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} - \text{per } 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \sqrt{v_{ar}} \text{ per } 2,38 (t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

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

dove:

PMV è il voto medio previsto;

$M$  è l'energia metabolica, in watt per metro quadrato di superficie corporea<sup>2</sup>;

$W$  è il lavoro esterno, in watt per metro quadrato, uguale a zero per la maggior parte delle attività;

$I_{cl}$  è la resistenza termica dell'abbigliamento, in metri quadrati grado Celsius per watt<sup>3</sup>;

$f_{cl}$  è il rapporto tra l'area della superficie del corpo umano vestito e l'area della superficie del corpo umano nudo;

$t_a$  è la temperatura dell'aria, in gradi Celsius;

$\bar{t}_r$  è la temperatura media radiante, in gradi Celsius;

$v_{ar}$  è la velocità relativa dell'aria (relativa al corpo umano), in metri al secondo;

$p_a$  è la pressione parziale di vapore d'acqua, in pascal;

$h_c$  è il coefficiente di scambio termico convettivo, in watt per metro quadrato grado Celsius;

$t_{cl}$  è la temperatura superficiale dell'abbigliamento, in gradi Celsius.

;

Limiti:

Va notato che l'indice PMV, sebbene come detto largamente usato per la valutazione microclimatica degli ambienti termicamente moderati, presenta dei limiti dovuti al fatto che l'indice stesso è stato stabilito in condizioni di sedentarietà e pertanto è applicabile con qualche riserva per range di valori metabolici diversi.

Lo stesso Fanger consiglia di utilizzare l'indice nel range della scala psicofisica compreso tra -2 e +2 e per valori delle variabili climatiche compresi nei seguenti intervalli:

- ✓  $M$  = da 0.8 a 4 met;
- ✓  $I_{cl}$  = da 0 a 2 clo;
- ✓  $t_a$  = da 10 a 30°C;
- ✓  $t_{mr}$  = da 10 a 40°C;
- ✓  $V_{ar}$  = da 0 a 1m/s
- ✓  $P_v$  = da 0 a 2.7k Pa

## Il disagio locale

Le grandezze microclimatiche ambientali finora considerate consentono di determinare la sensazione di benessere termoigrometrico provata da un soggetto all'interno di un ambiente. Nonostante ciò, anche nel caso in cui i valori medi delle grandezze microclimatiche siano tali da garantire

le condizioni globali di benessere, può succedere che in alcuni punti dell'ambiente tali condizioni non siano rispettate a causa di disuniformità locali. Sono in particolare provocano disagio locale [7]:

1. elevata differenza



verticale di temperatura;

2. elevata asimmetria della temperatura media



**Figura 24: differenza verticale di temperatura**

radiante;

3. pavimento troppo caldo o troppo freddo;



**Figura 25: asimmetria della temperatura media radiante**

4. correnti d'aria.



**Figura 26: pavimento troppo caldo/freddo**

Figura 27: correnti d'aria

1. ELEVATA DIFFERENZA VERTICALE DI TEMPERATURA, rilevata tra la testa e le caviglie di un soggetto, può causare una sensazione di disagio negli occupanti, in particolare quando la temperatura a livello della testa è maggiore di quella a livello delle caviglie. Fanger ha stabilito una correlazione mediante la quale è possibile determinare la percentuale di persone insoddisfatte (PPD) in funzione della differenza tra la temperatura dell'aria a livello testa e a livello delle caviglie.

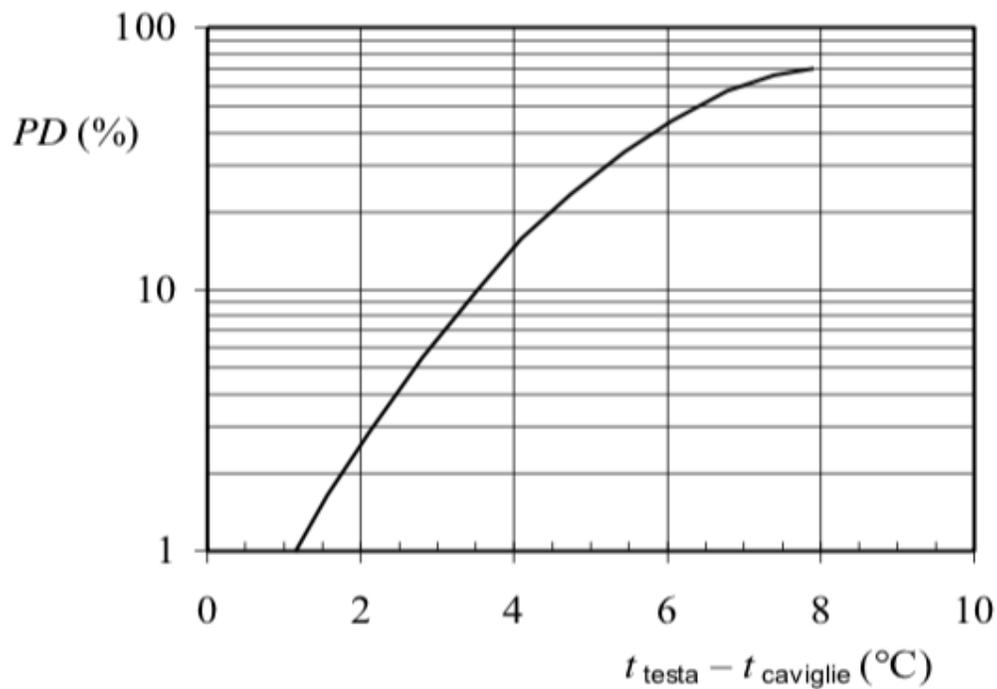


Figura 28: insoddisfatti in funzione della differenza verticale di temperatura

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856 \cdot \Delta t_{a,v})}$$

2. ASIMMETRIA DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE, consiste nella differenza tra la temperatura piana radiante di due superfici opposte all'interno di un ambiente. Nello specifico caso in cui l'attività degli occupanti sia di tipo sedentario, il soggetto esposto ad una radiazione termica asimmetrica prova una sensazione di disagio termico, soprattutto se l'asimmetria è dovuta a soffitti caldi piuttosto che pareti fredde.

Fanger ha stabilito una correlazione mediante la quale è possibile determinare la percentuale di persone insoddisfatte (PPD) in funzione dell'asimmetria della temperatura piana radiante.

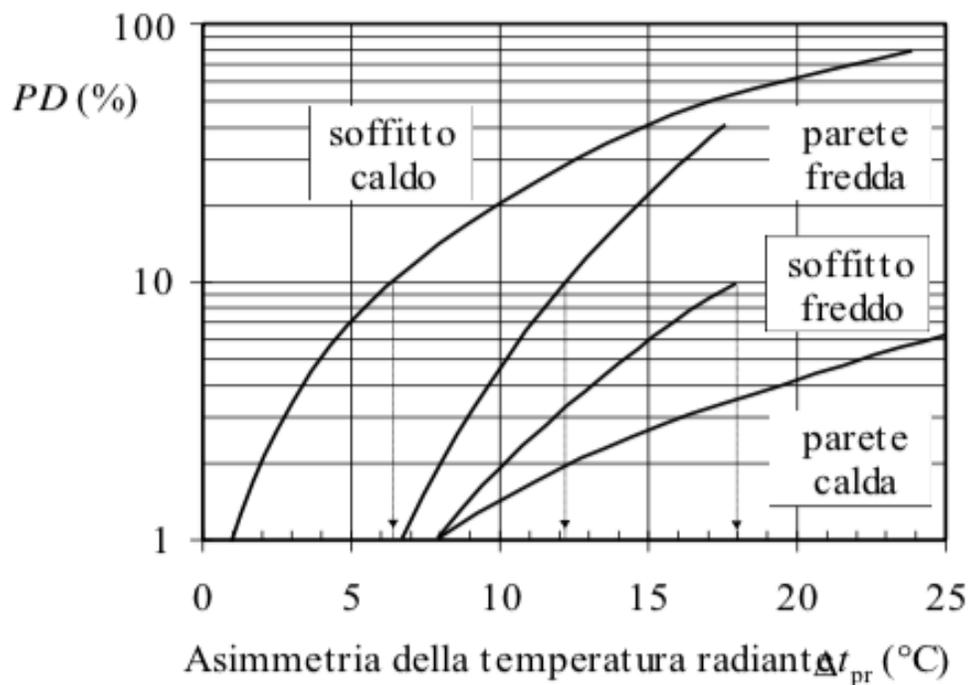


Figura 29: insoddisfatti in funzione della temperatura radiante

3. PAVIMENTO PIÙ CALDO O PIÙ FREDDO DELL'AMBIENTE, provoca, attraverso lo scambio termico che avviene sulla pianta dei piedi, una disuniformità di temperatura del corpo del soggetto. Per evitare sensazioni di disagio dovute ad un'alta o bassa temperatura dei piedi rispetto al resto del corpo, è necessario che la temperatura del pavimento sia compresa tra i 20°C ed i 30°C.

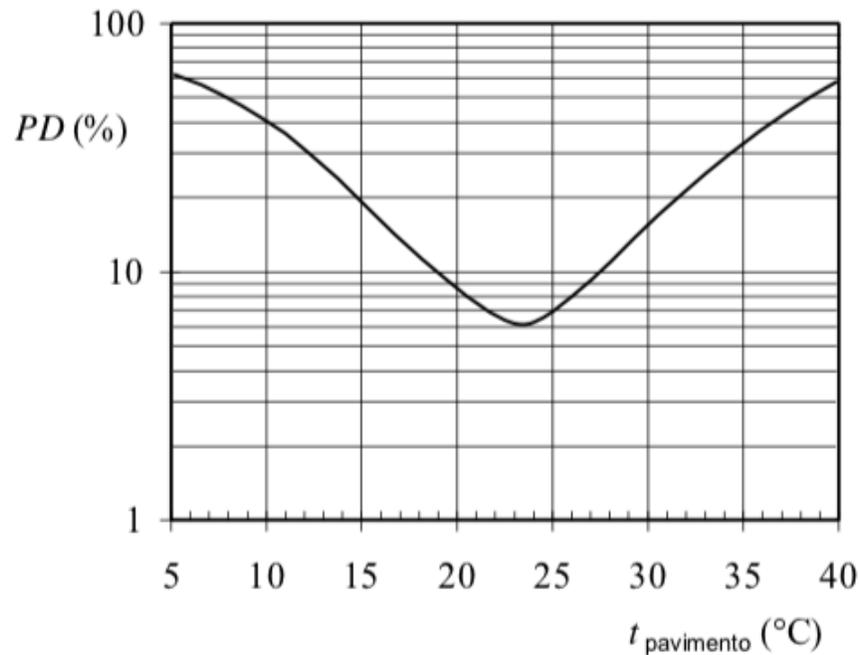


Figura 30: insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento

$$PD = 100 - 94 \cdot \exp(-1,387 + 0,118 \cdot t_f - 0,0025 \cdot t_f^2)$$

Percentuale di insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento. Caso di persone con scarpe e calze normali

#### 4. DISUNIFORMITA' LOCALI DELLA VELOCITA' DELL'ARIA

Le correnti d'aria rappresentano una delle cause più ricorrenti di disagio locale, in quanto possono provocare il raffreddamento indesiderato di alcune parti del corpo (quali il collo e le caviglie). Nella valutazione del disagio provocato da correnti d'aria, il fattore più immediato è sicuramente la velocità dell'aria stessa; non meno trascurabili sono fattori quali la temperatura della corrente che investe il soggetto e l'intensità della turbolenza.

Il rischio di disagio dovuto alle correnti d'aria può essere quantificato in termini di percentuale di persone insoddisfatte secondo un'equazione applicabile a soggetti sedentari e con sensazione termica prossima alla neutralità:

$$PPD = (34 - t_a) \cdot (v_m - 0.05)^{0.62} \cdot (0.37 \cdot v_m \cdot T_u + 3.14)$$

dove

PPD: percentuale di persone insoddisfatte dovuta alle correnti d'aria

ta: temperatura dell'aria \*°C]

vm: velocità media dell'aria \*m/s+

Tu: intensità di turbolenza \*%+ (rapporto tra la deviazione standard della velocità dell'aria e la velocità media dell'aria)

#### 4. DISUNIFORMITA' LOCALI DELLA VELOCITA' DELL'ARIA

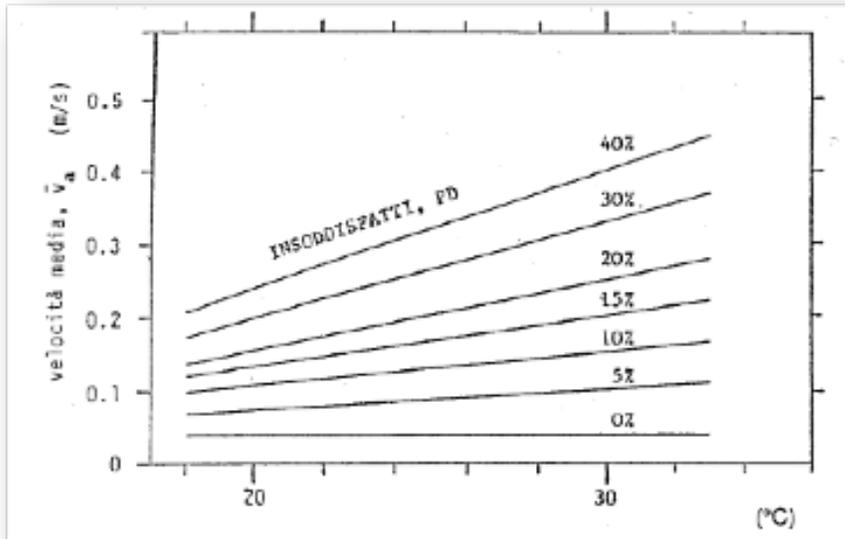


Figura 31: insoddisfatti per correnti d'aria in funzione di velocità media e temperatura dell'aria

La figura mostra la percentuale degli insoddisfatti per correnti d'aria a livello della parte superiore del corpo, in funzione della velocità media e della temperatura dell'aria

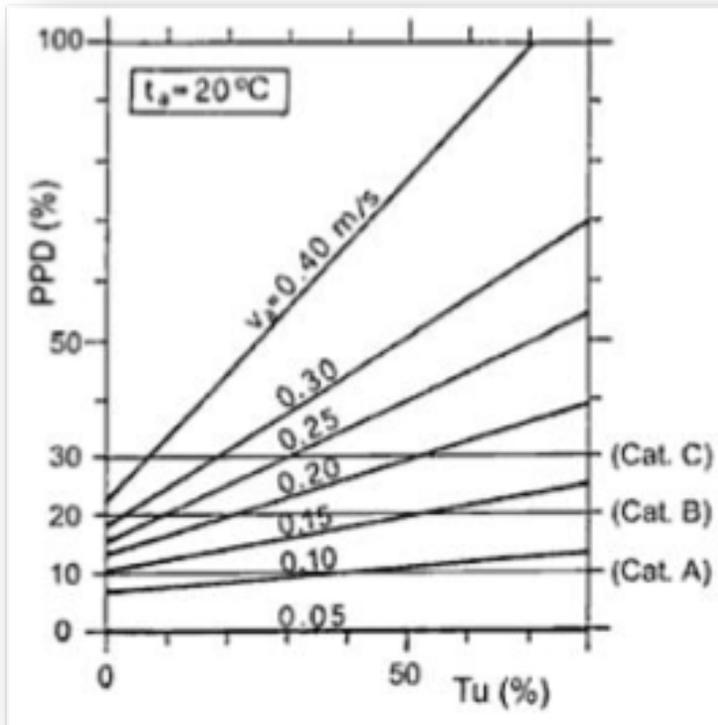


Figura 32: insoddisfatti in funzione dell'intensità della turbolenza

La figura mostra la percentuale degli insoddisfatti in funzione dell'intensità della turbolenza, per diversi valori della velocità media dell'aria in corrispondenza del soggetto.

## Equazione di Bilancio

Considerando un sistema costituito dal corpo umano e l'ambiente circostante, si può scrivere una EQUAZIONE DI BILANCIO ENERGETICO.

In essa viene espressa la condizione che l'energia prodotta dal metabolismo sia pari all'energia scambiata con l'ambiente sotto forma di calore o lavoro, in modo che non vi sia né aumento né diminuzione dell'energia interna.

Nell'unità di tempo il calore prodotto dal metabolismo viene scambiato con l'esterno per radiazione, convezione, conduzione ed evaporazione cutanea e respiratoria.

E' quindi possibile scrivere l'equazione generale:

$$S = \Delta U = M \pm W \pm R \pm C \pm C_K - C_{resp} - E \quad [W/m^2]$$

- quando  $S > 0$  la temperatura del corpo tende ad aumentare
- quando  $S < 0$  la temperatura del corpo tende a decrescere
- quando  $S=0$  siamo in presenza di equilibrio termico e quindi di potenziale benessere, condizione necessaria ma non sufficiente a causa dei meccanismi di autoregolazione della temperatura corporea

S: aumento o diminuzione di energia interna nell'unità di tempo (accumulo Termico)

M: energia nell'unità di tempo associata al metabolismo (funzione dell'attività)

W: potenza meccanica esterna: positiva se è compiuta dal corpo, negativa se è compiuta sul corpo

R: calore scambiato per irraggiamento dal soggetto con l'ambiente circostante; tale contributo è positivo o negativo a seconda che la temperatura degli oggetti circostanti è maggiore o minore della temperatura superficiale del corpo vestito

C: calore scambiato per convezione con l'aria ambiente. Tale quantità di calore è negativa o positiva a seconda che la temperatura dell'aria ambiente sia maggiore o minore di quella corporea

C<sub>k</sub>: calore scambiato per conduzione con gli oggetti che vengono a contatto con il corpo. In genere questo termine viene trascurato

C<sub>resp</sub>: calore scambiato attraverso la respirazione, associata alla variazione di entalpia dell'aria respirata

E: calore ceduto per evaporazione cutanea

L'organismo tende a permanere in condizioni di equilibrio omeotermo ( $S = 0$ ), ovvero che:

- potenza ceduta all'ambiente = potenza generata dai processi metabolici
- la temperatura interna si mantenga stabile su valori ottimali ( $36,7 \pm 0,3$  C)

Quindi l'equazione di bilancio può essere scritta come:

$$M - W - E - C_{resp} - R + C = 0$$

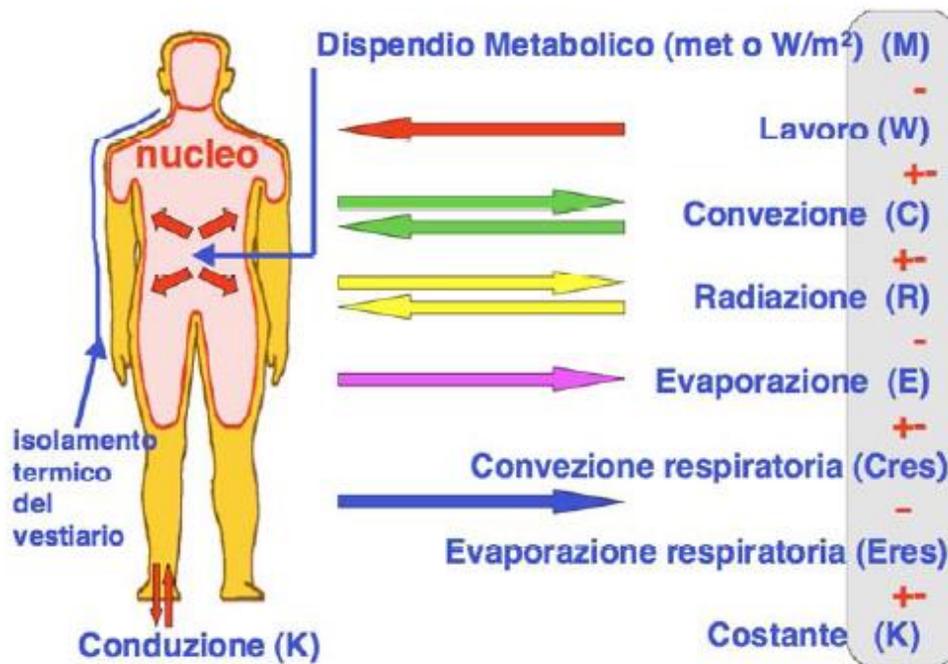


Figura 33: l'organismo tende a permanere in condizioni di equilibrio omeotermo

## Metabolismo

Da un punto di vista energetico il corpo umano può essere considerato, come una macchina termica che trasforma, attraverso il METABOLISMO, l'energia chimica introdotta sotto forma di cibi e bevande, in calore e lavoro. La trasformazione di energia chimica in calore e lavoro, avviene attraverso processi ossidativi e la sua entità dipende dall'attività del soggetto.

Per ciascuna attività e cioè per un dato lavoro esterno compiuto, si avrà una corrispondente produzione di calore che il corpo in parte cede all'ambiente circostante.

Quale unità di potenza metabolica si usa generalmente il Watt per unità di superficie corporea, oppure il MET.

$$1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$$

Il Met corrisponde al calore prodotto, per unità di tempo e di superficie corporea, da un uomo seduto e a riposo. L'area della superficie corporea di un uomo medio è stimata pari a  $1.8 \text{ m}^2$ .

Nella tabella sono riportati i carichi metabolici in funzione delle varie attività svolte da un soggetto.

<b>Tipo di attività</b>	<b>Valore metabolico [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Valore metabolico [met]</b>
Nessuna attività (dormire)	34	0.6
Nessuna attività (posizione sdraiata)	46	0.8
Nessuna attività (posizione seduta, rilassata)	58	1.0
Attività leggera sedentaria (ufficio, casa, scuola,...)	70	1.2
Attività leggera in piedi (compere, lavoro leggero)	93	1.6
Attività media in piedi (lavoro domestico, a macchina)	116	2.0
Attività media in piedi (camminare a 3 km/h )	140	2.4
Attività pesante (fare ginnastica)	174	3.0
Attività pesante (ballare)	290	5.0

## Cresp: calore scambiato attraverso la respirazione

Il calore scambiato attraverso la respirazione può essere considerato come la somma di due contributi:

- Uno dovuto allo scambio convettivo tra l'aria inspirata e gli alveoli polmonari (CALORE SENSIBILE)
- Ed uno dovuto al processo di evaporazione dell'acqua negli alveoli polmonari (CALORE LATENTE)

Per effetto dello scambio convettivo, l'aria inspirata si porta dalla temperatura ambiente alla temperatura corporea; per effetto dell'evaporazione l'aria si porta dall'umidità ambiente a condizioni di quasi saturazione

## Il flusso termico convettivo e radiativo C E R

I flussi di energia termica per irraggiamento e convezione attraverso la pelle R e C dipendono dalla resistenza termica superficiale (vestiario, velocità dell'aria) e dalla differenza tra la temperatura della pelle e rispettivamente la temperatura media radiante e dell'aria.

I meccanismi trasmissivi coinvolti sono quelli di conduzione (tra pelle e vestiario), convezione (tra vestiario e aria circostante) e irraggiamento (tra vestiario e pareti circostanti). In particolare

$$\begin{aligned} C &= A_b \cdot f_{cl} \cdot h_c (t_{cl} - t_a) \\ R &= A_b \cdot f_{cl} \cdot h_r (t_{cl} - t_{mr}) \end{aligned}$$

avendo indicato con  $h_c$  il coefficiente di convezione termica, W/(m<sup>2</sup>K);  $h_r$  il coefficiente di irraggiamento, W/(m<sup>2</sup>K);  $f_{cl}$  il fattore del vestiario (dato da  $f_{cl} = A_{cl}/A_b$  con  $A_{cl}$  e  $A_b$  superfici del vestiario e del corpo nudo)

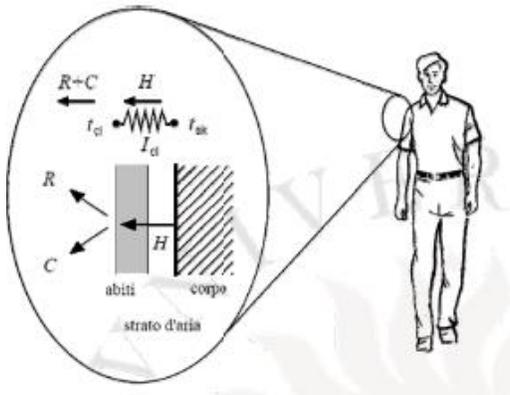
Combinando le due equazioni:

$$C + R = A_b \cdot f_{cl} \cdot (h_c + h_r) \cdot (t_{cl} - t_o)$$

Dove  $t_o$  è la temperatura operativa, definita come la media pesata secondo i coefficienti di scambio termico delle temperature dell'ambiente e della temperatura media radiante.

In condizioni stazionarie la potenza termica C + R scambiata per convezione e irraggiamento dalla superficie esterna è uguale a quella scambiata per conduzione tra pelle e abito [11], essendo:

$$f_{cl} \cdot (h_c + h_r) \cdot (t_{cl} - t_o) = \frac{(t_{sk} - t_{cl})}{0.155 \cdot I_{cl}}$$



## Temperatura operativa

La Temperatura operativa è definita come la temperatura di un ambiente virtuale uniforme e con parti nere, nel quale un generico soggetto scambia, mediante il complesso dei due meccanismi di convezione ed irraggiamento, la stessa potenza termica scambiata, nell' ambiente disuniforme reale, mediante il complesso degli stessi meccanismi. In termini analitici tale definizione si traduce nell' espressione:

$$t_o = (h_r t_r + h_c t_a) / (h_r + h_c)$$

dove:

$h_r$  e  $h_c$  sono i coefficienti di scambio termico, radiante e convettivo rispettivamente.  $t_r$  e  $t_a$  sono la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria rispettivamente.

Nei casi pratici in cui la differenza tra la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria è  $< 4^\circ\text{C}$  la temperatura operativa può essere calcolata con

$$t_o = A t_a + (1 - A) t_r$$

dove A è determinato in funzione della velocità relativa dell'aria

<b><math>V_{ar}</math> (m/s)</b>	<b>&lt; 0,2</b>	<b>0,2 - 0,6</b>	<b>0,6 - 1</b>
A	0,5	0,6	0,7

### Resistenza termica dell'abbigliamento

La resistenza termica unitaria dell'abbigliamento viene generalmente espressa mediante l'unità di misura incoerente "clo"

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Questa resistenza termica va intesa come un valore equivalente, in quanto il calore attraverso gli abiti si trasmette sia per conduzione attraverso il tessuto che per conduzione attraverso le fibre. Il suo valore dipende più dal tessuto che dall'aria in esso contenuta ed a sua volta la resistenza del tessuto dipende poco dal tipo e molto dallo spessore.

Per avere un'idea dei valori che si possono incontrare si riportano alcuni esempi indicativi:

- Corpo nudo = 0 clo
- Soggetto con vestito estivo = 0.3-0.6 clo
- Soggetto con vestito invernale = 0.7-1.2 clo
- Vestito pesante con soprabito = 1.8 clo

Tab. II - Resistenza termica dei singoli indumenti

TIPO DI INDUMENTO	$I_{cl} \left[ \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w} \right]$	$I_{cl}$ clo
Calzini leggeri	0.0047	0.03
pesanti	0.007	0.04
Sottogonna	0.02	0.13
Collant	0.002	0.01
Slip e reggiseno	0.0085	0.05
Canottiera	0.0093	0.06
Mutande	0.0085	0.05
Pantaloni leggeri	0.045	0.29
pesanti	0.07	0.45
Gonna leggera	0.022	0.14
pesante	0.035	0.23
Camicia maniche corte	0.031	0.20
maniche lunghe	0.045	0.29
Abito leggero	0.026	0.17
pesante	0.098	0.63
Pullover	0.055	0.35
Giacca pesante	0.076	0.49
leggera	0.02	0.13
Scarpe chiuse	0.0065	0.04
Sandali	0.003	0.02
Stivali	0.012	0.08

Tab. III - Resistenza termica per combinazioni tipiche di abbigliamento

TIPO DI INDUMENTO	$I_{cl} \left[ \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w} \right]$	$I_{cl}$ clo
Nudo	0	0
Calzoncini corti	0.015	0.1
Abbigliamento leggero estivo (Uomo) (Mutande, pantalone leggero, camicia a maniche corte, cal- zini, scarpe)	0.095	0.6
Abbigliamento leggero estivo (Donna) (Slip e reggiseno, gonna leg- gera, camicia maniche corte, sandali)	0.046	0.3
Abbigliamento pesante (Uomo) (Mutande, canottiera, camicia maniche lunghe, pantaloni pesanti, giacca pesante, cal- zini, scarpe)	0.19	1.2
Abbigliamento pesante (Donna) (Slip e reggiseno, maglietta, sottogonna, golf, gonna pe- sante, collant, scarpe)	0.012	0.7
Abbigliamento pesante con cappotto	0.23	1.5

## Calore scambiato per evaporazione cutanea

Il calore scambiato per evaporazione cutanea, è parimenti dovuto a due contributi:

- Uno relativo alla traspirazione  $E_t$ ;
- Uno relativo alla sudorazione  $E_w$

Il contributo dovuto alla traspirazione consiste in un fenomeno di diffusione dell'acqua contenuta nei tessuti attraverso la pelle verso l'aria ambiente. L'entità della traspirazione dipende dalla permeabilità della pelle, è proporzionale al calore latente di vaporizzazione e alla differenza tra la tensione di vapor d'acqua alla temperatura della pelle e la pressione parziale del vapor d'acqua contenuta nell'aria ambiente

Il secondo contributo dipende dalla temperatura della pelle, dalla umidità relativa dell'aria e dalla velocità dell'aria che lambisce la cute.

## Normativa UNI EN ISO 7730

Gli studi relativi al benessere ambientale e gli indici microclimatici proposti da Fanger hanno ispirato la stesura della norma UNI EN ISO 7730 che ha per oggetto "Ambienti termicamente moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifiche per le condizioni di benessere termico".

In base alla norma l'indice PMV, può essere calcolato tramite programmi di calcolo o con tabelle di facile consultazione. Nella norma, relativamente a ciascuna attività è possibile, note le variabili microclimatiche ambientali, determinare l'indice PMV.

Abbigliamento		Temperatura operativa °C	Velocità relativa dell'aria m/s							
clo	m <sup>2</sup> .°C/W		< 0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00
0	0	25	-1,33	-1,33	-1,59	-1,92				
		26	-0,83	-0,83	-1,11	-1,40				
		27	-0,33	-0,33	-0,63	-0,88				
		28	0,15	0,12	-0,14	-0,36				
		29	0,63	0,56	0,35	0,17				
		30	1,10	1,01	0,84	0,69				
		31	1,57	1,47	1,34	1,24				
		32	2,03	1,93	1,85	1,78				
0,25	0,039	23	-1,18	-1,18	-1,39	-1,61	-1,97	-2,25		
		24	-0,79	-0,79	-1,02	-1,22	-1,54	-1,80	-2,01	
		25	-0,42	-0,42	-0,64	-0,83	-1,11	-1,34	-1,54	-2,21
		26	-0,04	-0,07	-0,27	-0,43	-0,68	-0,89	-1,06	-1,65
		27	0,33	0,29	0,11	-0,03	-0,25	-0,43	-0,58	-1,09
		28	0,71	0,64	0,49	0,37	0,18	0,03	-0,10	-0,54
		29	1,07	0,99	0,87	0,77	0,61	0,49	0,39	0,03
		30	1,43	1,35	1,25	1,17	1,05	0,95	0,87	0,58

In tali tabelle, relative ad un valore di umidità relativa del 50%, compare come variabile indipendente la temperatura operativa calcolata come media pesata della temperatura dell'aria e della temperatura media radiante.

Activity level: 69.6 W/m<sup>2</sup> (1.2 met)

## Normativa UNI EN ISO 7730

Ambienti termici accettabili per il benessere

Il benessere termico è definito come la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico. A causa delle diversità tra gli individui è impossibile indicare un ambiente termico che soddisfi tutti. Ci sarà sempre una percentuale di persone insoddisfatte. Ma è possibile indicare ambienti che si prevede siano accettabili per una certa percentuale di occupanti.

Negli edifici in base alla loro destinazione d'uso, potrebbe essere desiderabile fissare dei livelli di qualità in base a considerazioni di carattere economico, energetico ed ambientale. La UNI EN ISO 7730 propone tre classi di qualità di comfort termico in termini di percentuale di insoddisfatti

Classe	Comfort globale		Discomfort localizzato			
	PPD (%)	PMV	DR (%)	Differenza verticale di temperatura (%)	Pavimento caldo o freddo (%)	Asimmetria della temperatura radiante (%)
A	<6	-0.2<PMV<+0.2	<10	<3	<10	<5
B	<10	-0.5<PMV<+0.5	<20	<5	<10	<5
C	<15	-0.7<PMV<+0.7	<30	<10	<15	<10

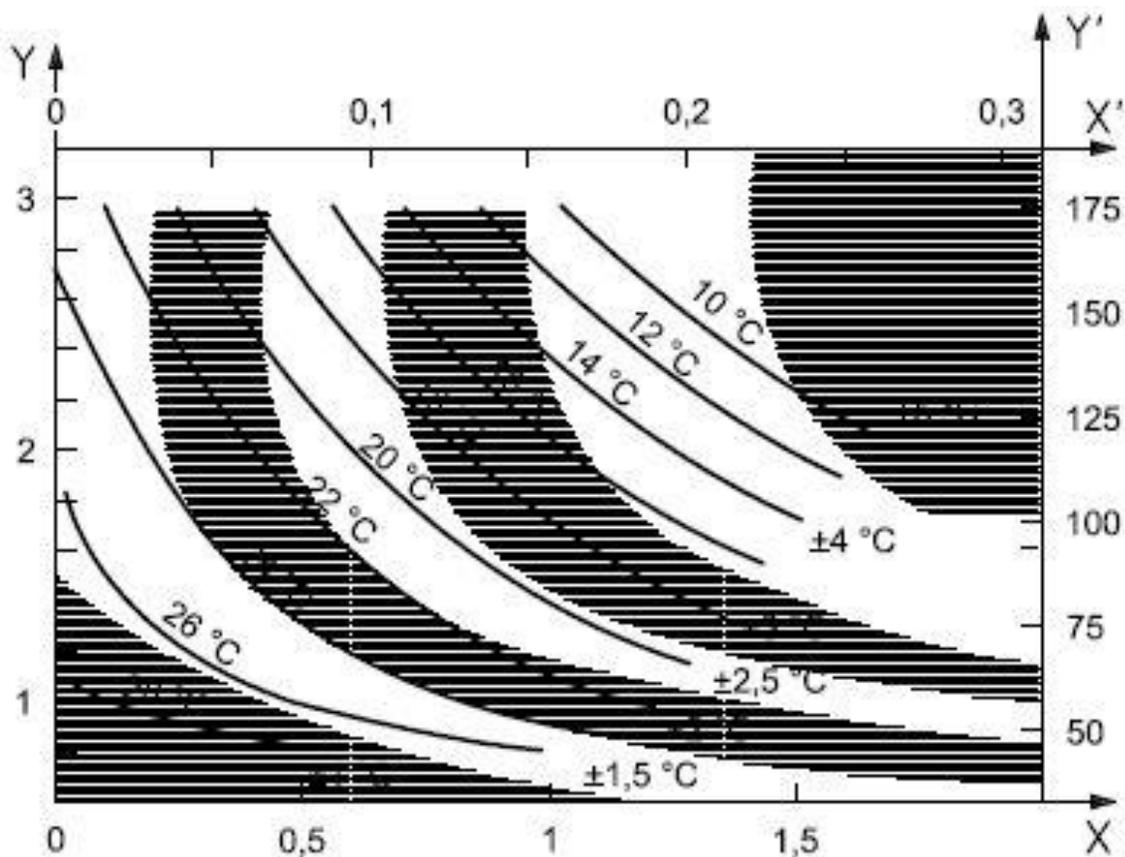
## Normativa UNI EN ISO 7730 – UNI EN 15251

Ambienti termici accettabili per il benessere

- La UNI EN 15251 propone 4 categorie di edifici e per ognuna definisce le qualità di comfort termico in termini di percentuali di insoddisfatti

Categoria	Comfort globale		Spiegazione categorie
	PPD (%)	PMV	
I	<6	$-0.2 < PMV < +0.2$	Alto livello di aspettativa; è raccomandata per spazi occupati da persone molto sensibili e fragile che hanno bisogno di requisiti specifici (bambini, malati, ecc)
II	<10	$-0.5 < PMV < +0.5$	Livello normale di aspettativa; utilizzata per le nuove costruzioni o per le ristrutturazioni
III	<15	$-0.7 < PMV < +0.7$	Un moderato livello di aspettativa; utilizzata per edifici esistenti
IV	>15	$PMV < -0.7$ e $PMV > 0.7$	Valori al di fuori dei criteri delle precedenti categorie; questa categoria dovrebbe essere accettata solo per una limitata parte dell'anno

Per ogni ambiente esiste una temperatura operativa ottimale, corrispondente a  $PVM=0$ , funzione dall'attività e dell'abbigliamento degli occupanti. La norma propone dei grafici in cui viene indicata la temperatura operativa ottimale e il range di temperatura ammissibile in funzione di abbigliamento e dell'attività svolta per ciascuna delle tre categorie



Category B: PPD < 10 %

- PPD predicted percentage dissatisfied, %
- X basic clothing insulation, in clothing units, (clo)
- X' basic clothing insulation, in clothing units,  $m^2 \cdot ^\circ C/W$
- Y metabolic rate, in metabolic units, (met)
- Y' metabolic rate, in metabolic units,  $W/m^2$

Le aree tratteggiate danno gli intervalli T di temperatura operativa ottimali. I grafici valgono per UR=50%, velocità dell'aria < 1 m/s.

ESEMPIO – Categoria B

Ufficio con attività metabolica di 1.2 met temperatura operativa accettabile (cioè tali che  $-0.5 < PMV < 0.5$ ):

- In inverno, con abbigliamento 1 clo:  $t_o = 20^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ;
- In estate, con abbigliamento 0.5 clo:  $t_o = 24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

La norma propone per diversi tipi di ambienti dei criteri di progetto

Table A.5 — Example design criteria for spaces in various types of building

Type of building/space	Activity W/m <sup>2</sup>	Category	Operative temperature °C		Maximum mean air velocity <sup>a</sup> m/s	
			Summer (cooling season)	Winter (heating season)	Summer (cooling season)	Winter (heating season)
Single office	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
Landscape office		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
Conference room		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 <sup>b</sup>
Auditorium			24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 <sup>b</sup>
Cafeteria/restaurant	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 <sup>b</sup>
Classroom		B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,18	0,15 <sup>b</sup>
		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 <sup>b</sup>
Kindergarten	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 <sup>b</sup>
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,20	0,15 <sup>b</sup>
Department store		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> The maximum mean air velocity is based on a turbulence intensity of 40 % and air temperature equal to the operative temperature according to 6.2 and Figure A.2. A relative humidity of 60 % and 40 % is used for summer and winter, respectively. For both summer and winter a lower temperature in the range is used to determine the maximum mean air velocity.

<sup>b</sup> Below 20 °C limit (see Figure A.2).

## MODELLO DI COMFORT ADATTIVO

Il modello adattivo riprende la definizione psicologica di benessere, andando ad approfondire anche la percezione dell'utente nei confronti dell'ambiente.

Il fondamento è nella capacità degli esseri umani di adattarsi all'ambiente in cui si trovano, agendo sulle variabili che li riguardano.

Il concetto di "adattamento" ad un ambiente si basa sulla variabilità delle aspettative climatiche degli occupanti, che manifestano un ruolo attivo, responsabile, nella gestione del microclima interno, riducendo il controllo dei sistemi impiantistici a favore delle opportunità di adattamento offerte dall'edificio stesso.

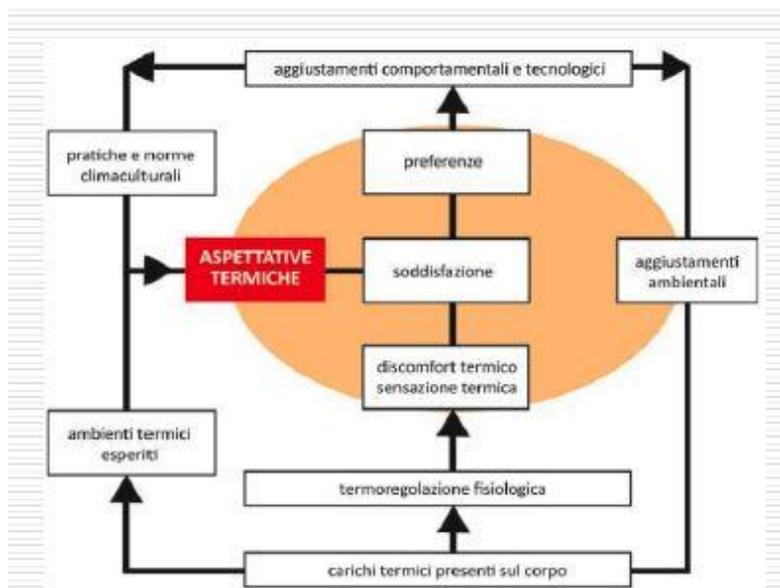


Figura 34: il Comfort adattivo

Tipo di adattamento:

- Comportamentale
- Fisiologico
- Psicologico

## Meccanismi di adattamento

### COMPORIMENTALE

Include tutte le azioni condotte, coscientemente e non, da un individuo al fine di interagire sui flussi di calore del bilancio termico corporeo. Tali azioni possono essere sotto classificate in:

- personali (ad esempio la rimozione di un indumento)
- tecnologiche (l'accensione di un sistema di condizionamento)
- culturali (riposare durante le ore più calde del giorno)

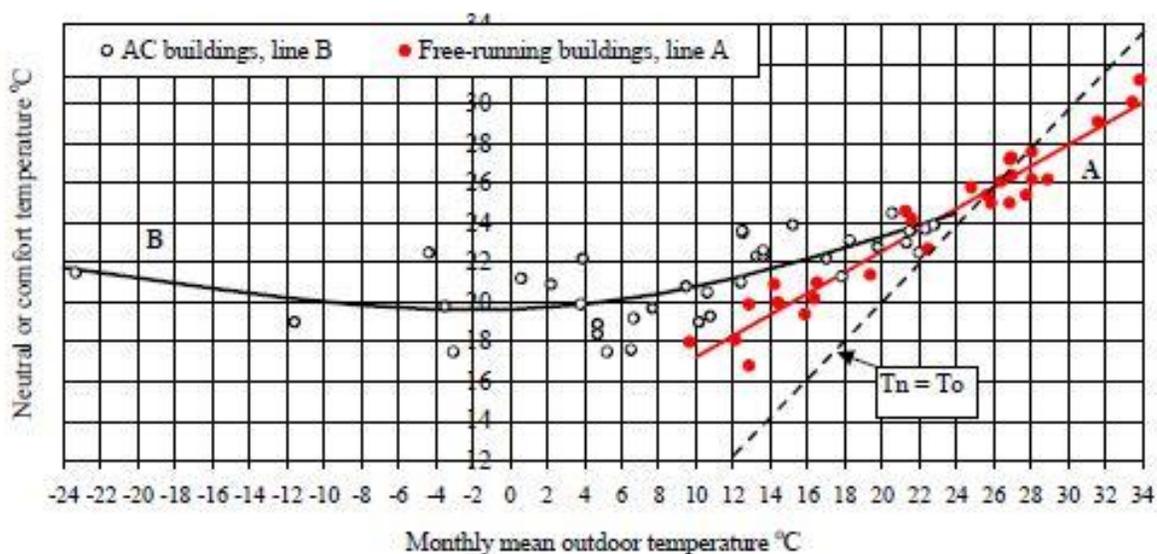
### FISIOLOGICO

Dipende dalla capacità dell'uomo di acclimatarsi ad un ambiente attraverso una naturale riduzione dell'attività metabolica. Questo meccanismo è maggiormente sviluppato nei popoli che fronteggiano costantemente condizioni climatiche estreme.

### PSICOLOGICO

La dimensione psicologica di adattamento termico si riferisce all'alterazione percettiva delle informazioni sensoriali dovuta alle passate esperienze.

La temperatura di comfort "personale" può risultare anche molto diversa da quella termostatica poiché condizionata dall'assuefazione allo stimolo esterno.



Humphrey nel 1978 da una serie di studi sul campo. Ogni punto rappresenta la media di una specifica indagine. Negli edifici non climatizzati le aspettative sono meno stringenti.

Si è cercato di individuare una correlazione tra le effettive sensazioni termiche e le principali grandezze climatiche, in particolare negli edifici privi di impianti di climatizzazione meccanica.

E' stata individuata una correlazione diretta tra la temperatura di comfort interno e la temperatura esterna [Humphrey e Nicols] del tipo:

$$T_{co} = a \cdot T_{out} + b$$

Dove

$T_{co}$  è la temperatura interna di comfort

$T_{out}$  è la temperatura esterna di riferimento

$a$  è una costante che rappresenta la correlazione tra  $T_{co}$  e  $T_{out}$

$b$  è una costante che rappresenta la temperatura minima accettabile

La temperatura esterna di riferimento può essere:

- Temperatura media mensile
- Running mean external temperature

Rappresenta una combinazione lineare delle temperature medie giornaliere dei giorni precedenti, calcolata giornalmente.

$$T_{mr} = (1-\alpha) [T_{dm,n-1} + \alpha * T_{dm,n-2} + \alpha^2 * T_{dm,n-3} + \dots]$$

Questa equazione può essere semplificata a:

$$T_{mr} = (1-\alpha)T_{dm,n-1} + \alpha T_{dm,n-2}$$

Dove  $\alpha$  è una costante che varia tra 0 e 1. Il valore raccomandato è 0.8. Quindi si ha:

$$T_{mr} = 0.2 \cdot T_{dm,n-1} + 0.8 \cdot T_{mr,n-1}$$

Fascia di accettabilità:

- Da differenza di temperatura calcolata con PPD per  $\Delta T_{CO} = \pm a$  [°C], PPD = X%

EQUAZIONE ASHRAE [Sati Uniti, DeDear & Brager]

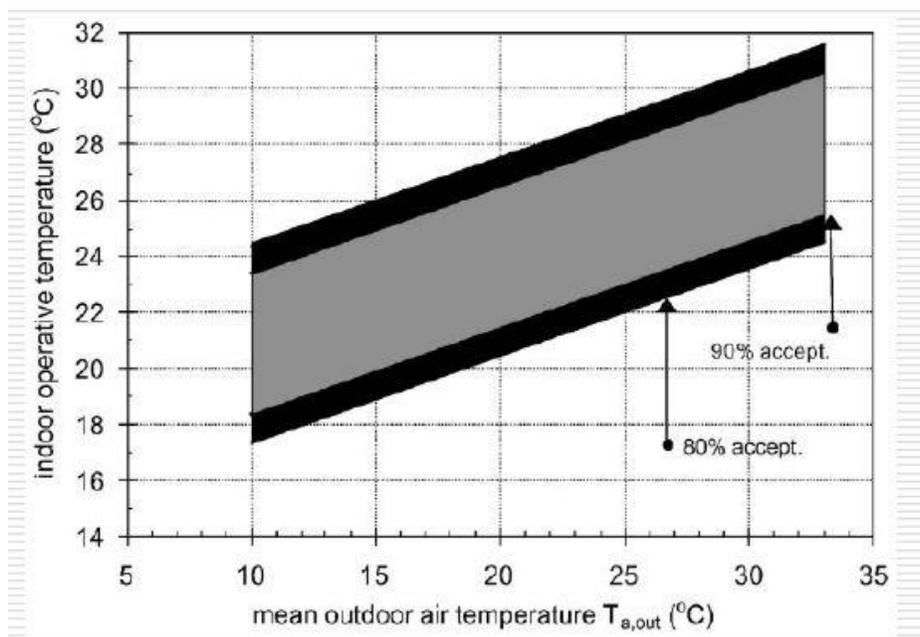
Per edifici con ventilazione naturale, se  $T_{out} > 12^\circ\text{C}$

$$T_{CO} = 0.31 \cdot T_{out} + 17.8$$

Fascia di accettabilità:

per  $\Delta T_{CO} = \pm 2.5^\circ\text{C}$ , PPD=10%

per  $\Delta T_{CO} = \pm 3.5^\circ\text{C}$ , PPD=20% Temperatura sterna di riferimento: Temperatura media mensile



EQUAZIONE PER NORMA UNI ISO 15251 [Europa]

Per  $T$  limite superiore  $> 10^\circ\text{C}$

Per  $T$  limite inferiore  $> 15^\circ\text{C}$

$$T_{CO} = 0.33 \cdot T_{out} + 18.8$$

Fascia

di

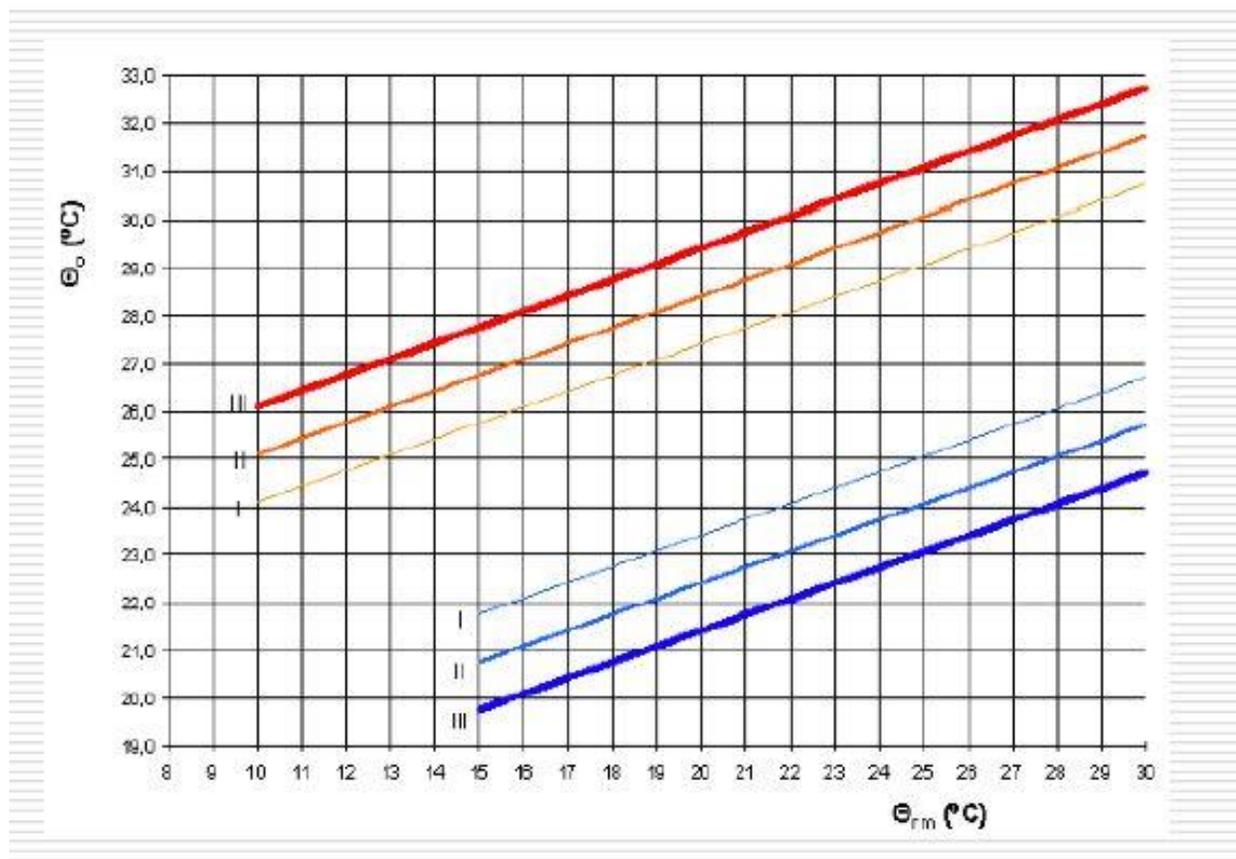
accettabilità:

per  $\Delta T_{CO} = \pm 2^\circ\text{C}$ , Categoria I

per  $\Delta T_{CO} = \pm 3^\circ\text{C}$ , Categoria II

per  $\Delta T_{CO} = \pm 4^\circ\text{C}$ , Categoria III

Temperatura sterna di riferimento: Running mean temperature



LIMITI DI APPLICABILITA' IN BASE ALLA DOTAZIONE IMPIANTISTICA

- Presenza di un impianto di climatizzazione estivo o invernale
- Presenza di un sistema di ventilazione meccanica
- Possibilità di apertura delle finestre da parte dell'utenza

#### ALTRE VARIABILI

- Umidità relativa (alta umidità riduce la fascia di accettabilità)
- Velocità dell'aria (per  $v_a > 0.1$  m/s,  $T_{co} = T_{co} + 7 - [50 / (4 + 10 * v_a^{0.5})]$ )
- Radiazione solare

#### CONSEGUENZE

- Il modello adattivo ha dimostrato di poter tenere in maggiore considerazione:
  - La variabilità delle condizioni climatiche
  - Le strategie passive di controllo ambientale
  - La capacità dell'utenza di agire direttamente sulle variabili ambientali
- E' stato messo a punto un algoritmo per la previsione della temperatura di comfort in funzione della temperatura esterna. Utilizzando questo algoritmo per controllare il setpoint dell'impianto di climatizzazione si può arrivare a risparmiare il 25% di energia.

#### APPLICAZIONI

Campi di applicazione dell'approccio adattivo:

- Progettuale, come strumento d'aiuto per le scelte del progettista
- Normativa, per la determinazione di condizioni più restrittive all'installazione degli impianti di climatizzazione
- Di gestione impiantistica, per la determinazione delle temperature di setpoint per il funzionamento degli impianti di climatizzazione.

## Strumenti per la misura delle grandezze microclimatiche

Gli strumenti utilizzati per misurare le principali grandezze microclimatiche (temperatura aria, umidità relativa, temperatura media radiante e velocità dell'aria) da cui dipende il benessere termico, sono:

### PSICOMETRO

Lo psicrometro mediante le misure delle temperature dell'aria a bulbo secco e umido, di calcolare l'umidità relativa e le altre grandezze ad essa connesse come la temperatura di rugiada, l'entalpia dell'aria e l'umidità assoluta.

Questa sonda è costituita da due sensori di temperatura; il primo è un termometro a bulbo asciutto che misura la temperatura secca dell'aria, il secondo è un termometro rivestito da una guaina idrofila, con l'estremità opposta immersa in una vaschetta contenente acqua distillata, che misura la temperatura di bulbo umido a ventilazione forzata



Figura 35: psicometro

## GLOBOTERMOMETRO

La sonda globotermometrica in rame nero è utilizzata per la misura della temperatura media radiante; è costituita da un globo metallico cavo nero, al centro del quale è montato un sensore termometrico. La temperatura rilevata consente di calcolare la temperatura media radiante, note che siano la temperatura secca e la velocità dell'aria. Una volta posto in un ambiente esso scambia calore per irraggiamento con le pareti e gli oggetti e per convezione con l'aria dell'ambiente fino al raggiungimento dell'equilibrio termico. All'equilibrio il sensore misura la temperatura dell'aria interna della sfera, la temperatura globotermometrica o di globo.



**Figura 36: globotermometro**

## SONDA ANEMOMETRICA

La sonda anemometrica a filo caldo è lo strumento per la misura puntuale della velocità dell'aria. Il principio di funzionamento è fondato sullo scambio termico tra l'aria l'elemento sensibile dello strumento.

Questo ultimo è costituito da un filamento di platino posto all'interno di un tubo in cui viene fatta passare l'aria e collegato mediante un circuito ad generatore di corrente.

Mediante un voltmetro ed un amperometro viene misurata la differenza di potenziale ai capi del filamento e l'intensità di corrente  $I$  che lo attraversa consentendo così di calcolare la resistenza  $R$ . Nota poi la dipendenza lineare di  $R$  con la temperatura si determina la temperatura del filo.



**Figura 37: sonda anemometrica**

## RADIOMETRO NETTO

Temperatura radiante piana è la temperatura uniforme di un involucro virtuale in cui lo scambio radiativo su un lato di un piccolo elemento di superficie, piano, è pari a quello che si verifica nell'ambiente reale non uniforme. In pratica si definisce come la temperatura media radiante di un piccolo elemento di superficie, piano, nero e "orientato".

Si definisce dunque asimmetria della temperatura radiante piana, la differenza nei valori di temperatura radiante piana delle due facce opposte di un piccolo elemento di superficie nero e piano. Il concetto di asimmetria può essere utilizzato quando la temperatura media radiante non descrive esaurientemente lo scambio termico radiativo in ambiente, soprattutto in condizioni di accentuata eterogeneità.

Essa si misura attraverso un elemento piano a due facce, di cui bisogna specificare l'orientazione della normale, su cui si misura la temperatura, detto RADIOMETRO NETTO.



**Figura 38: radiometro netto**

## Conclusioni

Per gli edifici pubblici di nuova costruzione, in ristrutturazione e manutenzione i Criteri Ambientali Minimi del Decreto 11 gennaio 2017 *“Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l’edilizia e per i prodotti tessili”* prevedono dei limiti sul confort ambientale.

In particolare nell’allegato 2 sono indicati i criteri per il confort termo-igrometrico.

Per edifici di nuova costruzione si intendono gli edifici ai sensi del paragrafo 1.3 dell’allegato 1 del DM 26 giugno 2015 *“Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”*.

Per ottenere il confort termo-igrometrico il tecnico progettista deve garantire condizioni conformi almeno alla classe B della UNI EN ISO 7730 in termini di PMV e di PPD senza trascurare i requisiti previsti nella UNI EN 13788 (DM 26 giugno 2015) sui ponti termici.

Il tecnico per ogni ambiente termico deve valutare il confort globale del corpo umano nella stagione di raffrescamento e di riscaldamento secondo quanto previsto dalla UNI EN ISO 7730 per ottenere PMV e PPD e quindi la classe.

La valutazione del confort può essere eseguita analiticamente risolvendo le equazioni indicate dalla norma UNI EN ISO 7730 oppure attraverso i prospetti in appendice E alla stessa norma.

## Riferimenti

- [1] J.S. Haldane, The influence of high air temperature, *The Journal of Hygiene* 5 (1905) 494–513.
- [2] L. Hill, O. Griffith, M. Flack, The measurement of the rate of heat loss at body temperature by convection, radiation and evaporation, *Philosophical Transaction of the Royal Society* 207(B) (1916) 183–220.
- [3] F.C. Houghton, C.P. Yaglou, Determining equal comfort lines, *Journal of American Society of Heat Ventilation Engineers* 29 (1923) 165–176.
- [4] A.F. Dufton, The eupatheostat, *Journal of Scientific Instruments* 6 (1929) 249–251.
- [5] H.M. Vernon, *Journal of Physiology, London*, 70 (1930) XV.
- [6] H.M. Vernon, C.G. Warner, The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures, *The Journal of Hygiene* 32 (1932) 431–462.
- [7] V., Parsons, K. C. "Environmental ergonomics: a review of principles, methods and models." *Applied ergonomics* 31.6 (2000): 581-594.
- [8] <https://www.iso.org/standard/34076.html>
- [9] Fanger P.O., *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*; Copenhagen Danish Technical Press, 1970.
- [10] A.P. Gagge, Man, his environment, his comfort, *Federal Proceedings* (1941). Bonino, D., & Corno, F. (2008, October).
- [11] ANSI-ASHRAE Standard 55, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, 2004
- [12] Fanger P.O, *Thermal Environment-Human Requirements*, *The Environmentalist*, Volume 6, Number 4 (1986) pp. 275-278.
- [13] UNI EN ISO 7730:2006, *Ergonomia degli ambienti termici -Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*, Ente nazionale di Unificazione Italiano, Milano.
- [14] ShaikhP.H., Bin Mohd. NorN. ,NallagowndenP., Elamvazuthil.,IbrahimT., A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (2014) pp. 409–429
- [15] Taleghani M., Tenpierik M., Kurvers S., van den Dobbelen A., A review into thermal comfort in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26(2013), pp. 201–215