



Modelli di valutazione del comfort termo-igrometrico

Se il risparmio energetico è un tema ormai assodato, risultano i nuovi obiettivi da raggiungere la salubrità e il comfort degli ambienti interni. Ma quando siamo in situazioni di comfort? Come può essere questo progettato prima e misurato poi? Progetto Dhomo si pone l'obiettivo di rispondere a queste domande ponendo delle solide ipotesi in fase progettuale e verificandole tramite il cantiere-laboratorio realizzato per condurre le analisi necessarie.

Si definisce **comfort ambientale** quella particolare condizione di benessere determinata dalle percezioni sensoriali di una persona in base alla temperatura, all'umidità dell'aria, al livello di rumorosità e luminosità rilevati all'interno di un ambiente. Il comfort ambientale si identifica quindi con il **benessere psicofisico** delle persone che vivono in un ambiente chiuso, sia esso un'abitazione o un posto di lavoro, ed è una sensazione strettamente legata a determinate condizioni ambientali in buona parte già pianificabili durante la fase di progettazione di un edificio.

Il benessere termo-igrometrico

Il benessere termo-igrometrico dell'individuo può essere definito come "la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico" [UNI ISO EN 7730] e coincide con lo stato in cui il soggetto non sente né caldo né freddo. Questo è l'aspetto del comfort maggiormente analizzato e considerato dalla normativa europea per la realizzazione di edifici che garantiscano la qualità della vita indoor.

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**, con l'obiettivo di coprire anche le diverse sensibilità soggettive.

I modelli più utilizzati per valutare il comfort termico ad oggi sono:

- **Modello di Fanger**
- **Modello adattivo**

www.minierasanromedio.it

www.tassullo.it

www.hdsystem.it

www.purocomfort.it



info@minierasanromedio.it

minierasanromedio@pec.it

T • +39 0463 66 2100

F • +39 0463 73 9450



Modello di Fanger

È stato sviluppato negli anni '60 ed è lo standard principale a cui si rifanno le principali normative. Esso vede le persone come **soggetti passivi di scambio termico**, all'interno di ambienti chiusi verso l'esterno e climatizzati. Tale modello prescrive temperature ottimali pressoché costanti, a parità dei valori di sei variabili indipendenti:

- ✓ temperatura (T_a)
- ✓ umidità relativa (U_r)
- ✓ velocità dell'aria (v)
- ✓ temperatura media radiante ($T_{m.rad}$) (sinteticamente, è la media delle temperature superficiali di pareti, solai, finestre e porte di una stanza)
- ✓ isolamento termico del vestiario (clo)
- ✓ livello di attività metabolica (met)

Gli indici di comfort secondo il modello di Fanger, funzione delle sei variabili di cui sopra, sono il **PMV** (Predicted mean vote o Voto Medio Previsto) e il **PPD** (Percentage People Dissatisfied). Il PMV esprime la sensazione media di comfort degli occupanti di una stanza ed è espresso su di una scala numerica che può andare da -3, sensazione di "molto freddo", a +3, sensazione di "molto caldo", dove 0 è il valore ideale. Il PPD esprime la percentuale di persone insoddisfatte in un determinato ambiente ed è dunque espresso con valore percentuale da 0 a 100.

Negli ultimi anni molti ricercatori hanno iniziato a mettere in dubbio la validità di questo tipo di impostazione, che non tiene conto di importanti fattori come quelli climatici, culturali, sociali e contestuali, ed hanno introdotto il **concetto di adattamento**, che spiega come il contesto e la storia termica di ciascun soggetto possano modificare le aspettative e le preferenze termiche degli occupanti.

Nel **modello di Fanger** la condizione interna ottimale di un edificio (quella in cui gli occupanti si sentono in condizioni gradevoli) è correlata esclusivamente ai parametri relativi alle **condizioni interne** all'edificio (es. temperatura dell'aria e velocità, temperatura media radiante, umidità dell'aria), alle caratteristiche del vestiario e al tasso metabolico degli occupanti. Questo modello si basa sulle **correlazioni trovate tra l'impressione di comfort soggettiva delle persone e le condizioni termiche** (es. umidità relativa, tasso metabolico, vestiario) **all'interno di un ambiente chiuso e controllato**. Anche se esso tiene conto di come le persone sono vestite e della loro attività, risulta spesso necessario assumere valori tipici per il vestiario e per i tassi metabolici. Questo può condurre a definire una banda statica e stretta di temperature "confortevoli" da applicare uniformemente nello spazio e nel tempo. Le temperature statiche sfavoriscono

www.minierasanromedio.it

www.tassullo.it

www.hdsystem.it

www.purocomfort.it

info@minierasanromedio.it

minierasanromedio@pec.it

T • +39 0463 66 2100

F • +39 0463 73 9450



le tecnologie passive, le quali sono efficaci nel moderare le fluttuazioni delle condizioni esterne, ma in generale non sono in grado di disaccoppiarle completamente dall'ambiente interno.



1. Stazione microclimatica posizionata in una delle stanze monitorate, restituisce PMV e PPD

Modello di comfort adattivo

In questo modello l'**occupante** di un edificio non è più semplicemente inteso come un soggetto passivo, così come appariva nel modello statico (Fanger PMV), ma come un **agente attivo che interagisce** a tutti i livelli con l'ambiente in cui soggiorna.

Si tratta di un modello che propone una **correlazione tra la temperatura di comfort per gli occupanti (T_{op}) di un edificio e la temperatura media dell'aria esterna (T_{em})**. Il modello adattivo introduce quindi algoritmi di controllo e di risposta che permettono di migliorare il livello di comfort termico degli occupanti e di ridurre il consumo di energia.

Ecco la correlazione secondo la EN 16798-1:2019:

$T_{op} = 0,33 \cdot T_{em} + 18,8$ (Temperatura operativa ottimale giornaliera/oraria)

www.minierasanromedio.it

www.tassullo.it

www.hdsystem.it

www.purocomfort.it

info@minierasanromedio.it
minierasanromedio@pec.it

T • +39 0463 66 2100

F • +39 0463 73 9450





Si ottiene una fascia di comfort per un periodo desiderato (ad esempio la stagione estiva, in assenza di climatizzazione meccanica), calcolata sommando e sottraendo alcuni gradi °C (in funzione del tipo di edificio) dalla curva della temperatura operativa ottimale.

Alla base del modello di comfort adattivo c'è la convinzione che il soggetto, consciamente o inconsciamente, svolge un ruolo attivo nella creazione delle condizioni termiche che preferisce e che, per raggiungere più facilmente la soddisfazione nei confronti del microclima, attua un processo di adattamento, definito come quel processo di graduale diminuzione delle reazioni individuali agli stimoli ambientali.

Possiamo quindi distinguere tre tipi di adattamento:

comportamentale: l'insieme dei cambiamenti che una persona mette in atto, consciamente o no, per modificare i parametri che regolano il bilancio termico del corpo; può essere suddiviso in personale, tecnologico e culturale

fisiologico: l'esposizione prolungata a determinate condizioni riduce lo stress; questo tipo di adattamento ha un'influenza trascurabile sulla percezione del comfort nelle condizioni tipiche degli ambienti moderati

psicologico: le esperienze pregresse e le aspettative modificano la percezione degli stimoli sensoriali e la reazione ad essi.

Tra i tre meccanismi di adattamento quello comportamentale fornisce alle persone un ruolo attivo nel mantenimento del proprio comfort, proprio perché direttamente legato al bilancio termico del corpo umano. In linea di massima il **modello adattivo** definisce **temperature di comfort maggiori e più flessibili** rispetto al modello di Fanger. Spesso la temperatura di comfort adattiva ottimale può essere raggiunta utilizzando strategie di raffrescamento passivo, come l'ombreggiamento delle finestre e ventilazione notturna. In questi casi, il fabbisogno di raffrescamento si riduce praticamente a zero, e non è necessario (o quasi) un raffrescamento meccanico.

www.minierasanromedio.it

www.tassullo.it

www.hdsystem.it

www.purocomfort.it



info@minierasanromedio.it

minierasanromedio@pec.it

T • +39 0463 66 2100

F • +39 0463 73 9450



2. Progettazione passiva di ombreggiamento della finestra

Il concetto alla base di questo modello è il processo, documentato, per il quale il corpo umano si adatta (inclusa la variazione del tasso metabolico) al clima stagionale e locale. Di conseguenza, gli occupanti considereranno **temperature interne diverse** come confortevoli **a seconda della stagione e della località**. Per esempio, applicando l'algoritmo adattivo definito nella norma EN 16798-1:2019 a dati meteorologici annuali tipici, si arriva a prevedere temperature di comfort neutrali massime (in corrispondenza di una sequenza di giorni caldi) per città come Francoforte, Milano, Lisbona e Siviglia pari rispettivamente a 26.1°C, 27.2°C, 26.7°C, e 28.7°C.

Il modello di comfort adattivo è stato definito nel corso degli anni e collaudato in vari studi (Humphreys, 1975; 1978; 1979; Nicol, 1993; de Dear, 1998; Nicol & McCartney, 2001). Nella maggior parte delle attuali norme edilizie, la definizione di comfort termico segue la norma ISO 7730, che è basata sul modello stazionario di Fanger, ma in anni recenti, alcune norme internazionali (es. la norma americana ASHRAE 55 2004 e la norma europea EN 16798-1:2019) propongono modelli di comfort adattivo basati su sondaggi di comfort

www.minierasanromedio.it

www.tassullo.it
www.hdsystem.it
www.purocomfort.it

info@minierasanromedio.it
minierasanromedio@pec.it

T • +39 0463 66 2100

F • +39 0463 73 9450





effettuati negli edifici reali. Queste hanno introdotto **modelli adattivi per gli edifici ventilati in modo naturale**.

Altri modelli di valutazione

Un terzo modello è rappresentato dal **diagramma bioclimatico di Milne-Givoni**, adatto per prevedere le condizioni di comfort termico-igrometrico interno di un edificio in base alle condizioni climatiche esterne prevalenti. Givoni ha basato il suo studio sul rapporto lineare che intercorre fra l'ampiezza di temperatura e la pressione di vapore dell'aria esterna in varie regioni. Sul diagramma psicrometrico, sono indicati sovrapposti i limiti delle **strategie di raffrescamento e riscaldamento passive**.

Le strategie considerate includono:

- ✓ massa termica
- ✓ raffrescamento evaporativo
- ✓ ventilazione naturale diurna e notturna
- ✓ raffrescamento e riscaldamento passivo

Il diagramma bioclimatico di Givoni è uno **strumento di progetto**, un modo semplice per scegliere le strategie progettuali perseguibili per un edificio in funzione della zona climatica di appartenenza. Sovrapponendo sul diagramma bioclimatico di Givoni i punti salienti di una particolare zona climatica, derivanti dall'intersezione della temperatura dell'aria esterna e l'umidità specifica dell'aria, si ha una visione d'insieme delle condizioni climatiche. La concentrazione più o meno densa di tali punti su aree specifiche del grafico permette di scegliere le strategie progettuali da applicare all'edificio.

Progetto Dhomo

Allo stato attuale la valutazione del comfort di un ambiente può essere svolta in due fasi:

1. in fase di progetto, garantendo livelli di comfort che si riferiscono
 - a. a un range di valori presenti in tabelle
 - b. effettuando simulazioni al calcolatore con software dedicati
2. in fase di verifica del costruito, tramite
 - a. rilievi con sonde dedicate
 - b. somministrazione di questionari agli utenti

Mancano tuttavia **adeguate analisi** e studi comparati **sulle prestazioni di edifici con sistemi costruttivi e impiantistici differenti, con pari condizioni al contorno**. Progetto Dhomo, dunque, si è impegnato nella realizzazione di **4 edifici confrontabili tra loro** per

www.minierasanromedio.it

www.tassullo.it

www.hdsystem.it

www.purocomfort.it

info@minierasanromedio.it

minierasanromedio@pec.it

T • +39 0463 66 2100

F • +39 0463 73 9450





forma, volume, superficie ed esposizione, dove variano le finiture interne e dove è possibile utilizzare un diverso range di impianti, per essere in grado di determinare quanto ciascuno di questi elementi influenzi il comfort abitativo interno.

Sono perciò utilizzate stazioni microclimatiche in grado di rilevare tutti i parametri necessari alla definizione di **PPD e PMV**, e dunque anche la **temperatura operativa** considerata nel modello di comfort adattivo. Si prendono in considerazione entrambi i modelli, in primo luogo per avere un'indicazione del livello di comfort presente ed in secondo luogo per poter confrontare tra loro i risultati espressi dai due modelli mettendone così in evidenza anche validità e lacune. Attraverso entrambi i metodi si potranno definire i livelli di comfort raggiunti e la quantità di ore di discomfort registrate in ciascun edificio.

Si tengono inoltre in considerazione altri aspetti del comfort termo-igrometrico non considerati da questi modelli, come la **velocità di variazione delle** variabili come **temperatura e umidità**, e l'oscillazione giornaliera o conseguente all'utilizzo di sistemi di riscaldamento/raffrescamento. Nello specifico la velocità di variazione identifica una chiara situazione di discomfort, in quanto un troppo repentino cambio di temperatura è avvertito negativamente dall'utente, che non ha il tempo di adattarsi, mentre una variazione lenta permette l'adattamento e dunque un'elevata sensazione di comfort per periodi più prolungati. Analogamente oscillazioni troppo ampie o rapide all'accensione/spegnimento degli impianti di riscaldamento/raffrescamento possono risultare spiacevoli.

Infine, durante il periodo di monitoraggio ad **edifici abitati**, sarà possibile, tramite dei **questionari**, raffinare i modelli di comfort generici sul singolo utente, avvicinandosi così alla sfera del **comfort personalizzato**, derivato dalla concezione che ogni essere umano percepisce le stesse condizioni ambientali con diverso grado di apprezzamento.

Primi risultati sperimentali

Dall'analisi dei primi dati, incentrati sullo studio della finitura interna, risulta come la **capacità termica areica** dello strato più interno delle chiusure verticali incida fortemente sui livelli di comfort registrati. Questa, infatti, permette di **accumulare calore durante le ore calde** del giorno, quando il sole riscalda gli ambienti interni, e **rilasciarlo durante le ore della notte**, quando la temperatura interna cala. Il risultato è che gli edifici con **finitura interna "pesante"** (con elevata capacità termica areica) presentano valori di temperatura minimi e massimi giornalieri più contenuti rispetto agli edifici con finitura "leggera" e dunque hanno valori più compatti e più ottimali di PMV e PPD, così come di

www.minierasanromedio.it

www.tassullo.it

www.hdsystem.it

www.purocomfort.it

info@minierasanromedio.it

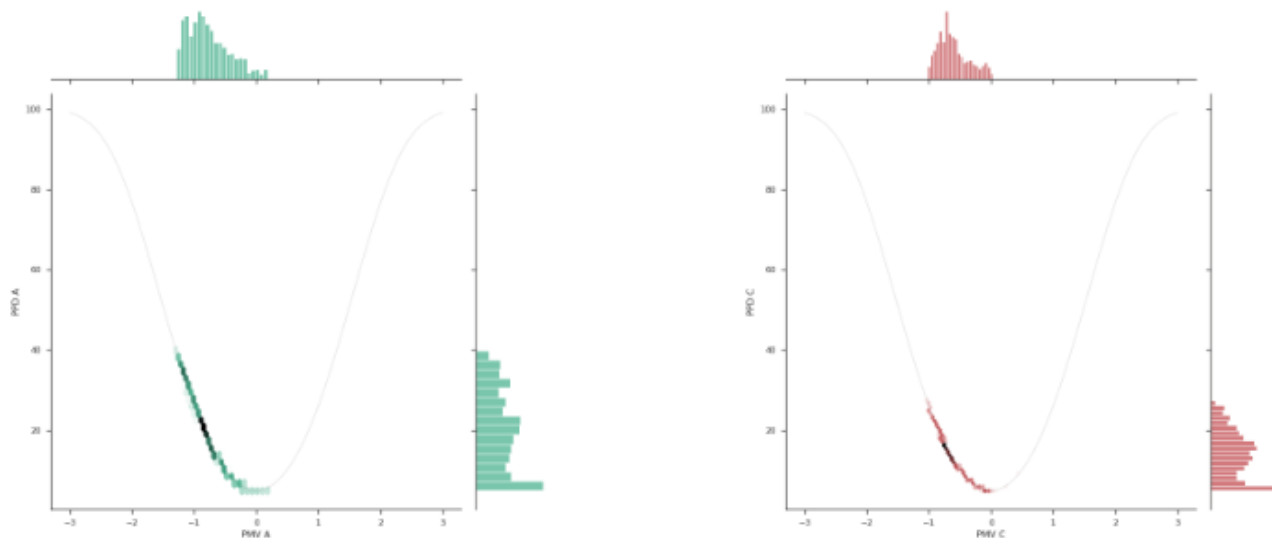
minierasanromedio@pec.it

T • +39 0463 66 2100

F • +39 0463 73 9450



temperatura operativa. Inoltre, le **variazioni di temperatura**, sia in aumento che in calo, sono **più lente** in questi edifici, e dunque meno avvertibili dall'eventuale utente.



3. Confronto dell'andamento di PMV e PPD per edificio a finitura leggera (A) e pesante (C)

Luca Endrizzi

Ricercatore

www.minierasanromedio.it

www.tassullo.it

www.hdsystem.it

www.purocomfort.it



info@minierasanromedio.it
minierasanromedio@pec.it

T • +39 0463 66 2100

F • +39 0463 73 9450