

IL BENESSERE TERMOIGROMETRICO NEGLI AMBIENTI MODERATI

Prof. ing. Vittorio Betta, Facoltà di Ingegneria di Napoli, Federico II.

1. IL BENESSERE

Il seminario di oggi è dedicato al benessere termoigrometrico; successive riunioni tratteranno la qualità dell'aria, il benessere acustico, visivo ed altro. Poiché l'incontro di oggi è il primo di questo interessante programma, è opportuno soffermarsi inizialmente sul concetto di benessere in senso lato.

La definizione di benessere, escludendo quanto di interesse delle teorie economiche, è abbastanza vaga, in quanto si richiama ad una condizione di generica e generale soddisfazione nella quale un individuo o più individui si trovano e dalle quale non vi è desiderio di allontanarsi.

Certamente il benessere rappresenta uno stato psico-fisiologico che coinvolge tutti i nostri sensi, da qui discende la necessità di studiare l'effetto che gli stimoli ambientali, termici, acustici, visivi, hanno sulla nostra psiche o sul nostro organismo. Si parlerà allora di benessere termico, acustico, visivo.

La definizione di benessere apparentemente guadagna in chiarezza se si delimita e definisce il settore al quale il benessere si riferisce, nel contempo però la consapevolezza della contemporanea presenza di vari tipi di benessere, aumenta la complessità del problema anche solo per l'aumentato numero di stimoli dei quali sarà necessario tener conto. D'altra parte è esperienza comune che per apprezzare una qualsiasi forma di benessere settoriale deve essere verificato il soddisfacimento di molte altre forme di benessere. Si può essere in un ambiente perfetto per l'ascolto della musica, o per meglio dire, di un particolare tipo di musica, avere la migliore orchestra del mondo, ma se malauguratamente si è investiti da una corrente d'aria fredda sul collo, si perderà molto del piacere della musica; la stessa cosa avverrà se abbagliati da un faro mal posizionato o anche solo se afflitti da un fastidioso mal di denti.

Il problema è molto complesso e ci si rende subito conto che le competenze ingegneristiche, per quanto vaste, non sono assolutamente sufficienti ad affrontare con un minimo di speranza di successo il problema del benessere; devono essere infatti coinvolti per lo meno medici, fisici, esperti di statistica,

psicologi . Non meravigli questo allargamento dei confini in quanto non bisogna dimenticare che al centro del problema del benessere c'è l'uomo, con la sua complessità e la sua assoluta mancanza di determinismo.

Qualcuno potrà pensare che questo approccio tenda a spaventare chiunque intenda dedicarsi a questo settore. L'obbiettivo è viceversa opposto, è quello di convincere gli uditori che gli argomenti attinenti al benessere hanno una serie di caratteristiche che li pongono, soprattutto in questi anni, in una luce particolarmente favorevole per diversi motivi:

- sono tematiche, per quanto premesso, certamente interdisciplinari;
- sono argomenti in sicura evoluzione per la tendenza continua a standard di comfort sempre più elevati;
- richiedono il controllo di un numero crescente di parametri con strumentazioni di misura sempre più sofisticate;
- sono un affascinante campo di ricerca verso la definizione di un indice globale, o un'unica scala di benessere, che superi i ristretti campi nei quali ci muoviamo oggi.

Infine, e non è una caratteristica di poco conto, gli specialisti del benessere devono necessariamente essere dotati di umiltà, virtù cristiana difficilmente posseduta dai tecnici, soprattutto se esperti, per il semplice motivo che qualunque loro realizzazione non riuscirà mai a soddisfare la totalità degli utenti, come fra poco vedremo parlando di benessere termoigrometrico.

2. IL BENESSERE TERMOIGROMETRICO

2.1 L'attività metabolica

Nelle cellule e nei tessuti del corpo umano avvengono un complesso di processi chimici e fisici che prendono il nome di *metabolismo*. Tali processi realizzano la trasformazione degli alimenti ingeriti e la trasformazione dell'ossigeno in anidride carbonica, consentendo la modificazione, l'accrescimento e la rigenerazione delle cellule dell'organismo, le funzioni fisiologiche indispensabili alla vita (quali l'attività nervosa, la circolazione del sangue, i movimenti respiratori) nonché le attività motorie. Si definisce *tasso metabolico*, o *metabolismo energetico* M la differenza tra l'energia somministrata mediamente nell'unità di tempo all'organismo sotto forma di alimenti, bevande e ossigeno e quella, media nell'unità di tempo, connessa a quanto scaricato dall'organismo stesso sotto forma di feci, urine, anidride carbonica. Il termine M viene anche impropriamente visto come un termine di

generazione per il volume di controllo uomo; non è costante nel tempo, dipendendo dalla qualità e quantità dei cibi ingeriti, dal momento della loro ingestione, dalle condizioni ambientali esterne, ma soprattutto dall'attività che la persona svolge: cresce passando dalla quiete ad attività intense e faticose. La potenza meccanica ceduta per le attività motorie è sempre minore del termine di generazione: pertanto il corpo umano, affinché la sua energia interna e la sua temperatura non varino, deve cedere energia all'ambiente circostante. Tale energia viene ceduta essenzialmente per convezione con l'aria, per irraggiamento con le superfici circostanti e tramite evaporazione di acqua, dalla pelle e dai polmoni.

Quando l'energia ceduta risulta maggiore (minore) del tasso metabolico, la temperatura media del corpo diminuisce (cresce) fino a giungere o ad una nuova condizione di regime o al collasso. L'organismo reagisce ad eventuali squilibri innescando complessi meccanismi di termoregolazione sui quali si tornerà successivamente. *Condizioni di benessere termico o termoigrometrico* sono definite le condizioni di soddisfazione termica per l'individuo ovvero le condizioni nelle quali l'individuo "non ha caldo né freddo". Da un punto di vista fisiologico rappresentano condizioni per le quali l'attività dei meccanismi di termoregolazione è modesta.

2.2 Meccanismi di termoregolazione.

Nella fisiologia della termoregolazione il corpo umano si suddivide in due zone: una esterna costituita dalla pelle e dai tessuti sottocutanei, ed una interna, o *nucleo*, comprendente gli organi vitali. Le due zone sono caratterizzate da temperature diverse; in un soggetto sano la temperatura del nucleo è quasi costante, mediamente uguale a 37°C , con variazioni nell'arco della giornata di $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. La funzione di mantenere quasi isoterma il nucleo del corpo è delegata al sistema di termoregolazione. Esistono due tipi di termoregolazione:

- vasomotoria
- comportamentale.

La termoregolazione vasomotoria interessa i capillari periferici, cioè quelli superficiali; essi sono dotati di sfinteri (valvole), che aprendosi o chiudendosi, permettono o impediscono l'afflusso di sangue.

In ambienti freddi si ha la chiusura delle valvole (vasocostrizione), con diminuzione dell'afflusso di sangue verso la periferia, con conseguente diminuzione della temperatura superficiale e dello scambio termico con l'esterno.

In ambienti caldi si riscontra la situazione opposta. L'apertura degli sfinteri determina un aumento dell'afflusso di sangue alla periferia, con conseguente aumento della temperatura della pelle e dello scambio termico con l'esterno.

Nel caso in cui la termoregolazione vasomotoria non sia sufficiente ad assicurare l'*omeotermia* del nucleo, interviene la termoregolazione comportamentale.

Contro il freddo essa si manifesta con il brivido, che consiste nell'attivazione di quasi tutti i gruppi muscolari e nell'aumento di generazione di energia all'interno del corpo; contro il caldo consiste nella sudorazione.

Se neanche la termoregolazione comportamentale è sufficiente ad assicurare l'*omeotermia*, si può avere *ipotermia* (fino alla morte per fibrillazione cardiaca) o *ipertermia* (fino alla morte per danni irreversibili alle proteine dei tessuti nervosi).

2.3 Il bilancio di energia sul corpo umano

Il bilancio di energia sul corpo umano è espresso dall'equazione:

$$S = M - (W + E_{\text{res}} + C_{\text{res}} + C + R + E + K) \quad (1)$$

Nella quale tutti i termini sono potenze, usualmente espresse in W, con:

S = accumulo di energia nel corpo

M = metabolismo energetico

W = potenza meccanica ceduta all'ambiente

E_{res} = potenza termica ceduta all'ambiente nella respirazione come calore latente

C_{res} = potenza termica ceduta all'ambiente nella respirazione come calore sensibile

C = potenza termica ceduta all'ambiente per convezione

R = potenza termica ceduta all'ambiente per irraggiamento

E = potenza termica ceduta all'ambiente per evaporazione dalla pelle

K = potenza termica ceduta all'ambiente per conduzione

2.4 Ambienti termicamente moderati

Si definiscono termicamente moderati gli ambienti nei quali la progettazione e la gestione degli impianti tendono al raggiungimento del

benessere termico, definito *come stato psicofisico in cui il soggetto esprime soddisfazione nei riguardi del microclima oppure come condizione in cui il soggetto non ammette nessuna sensazione di caldo o di freddo*. Entrambe le definizioni sono particolarmente semplici; estremamente più complesso è l'espressione del benessere termico o lo scostamento da esso in termini fisiologici o di parametri microclimatici.

Affinché si verificino condizioni di benessere termico o termoigrometrico l'accumulo di energia nel corpo deve essere praticamente nullo; poiché inoltre sia il termine relativo alla potenza meccanica che allo scambio conduttivo tra il corpo e gli oggetti a contatto con esso sono di entità trascurabile rispetto agli altri termini, l'equazione (1), in condizioni di benessere, può essere scritta:

$$M - (E_{res} + C_{res} + C + R + E) = 0 \quad (2)$$

- M dipende dal tipo di attività svolta; per un normotipo adulto va dai 100 W per condizioni di riposo ai 200 W per lavoro leggero fino ad oltre 500 W per attività sportive o sforzi intensi. Il metabolismo energetico viene spesso misurato, con riferimento alla superficie del corpo umano, nell'unità incoerente "met", essendo: $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2 = 50,0 \text{ kcal/h m}^2$;
- E_{res} e C_{res} sono funzioni di M, temperatura ed umidità dell'aria, complessivamente assumono valori delle decine di W;
- C è funzione del tipo di abbigliamento, della temperatura e della velocità dell'aria ambiente: assume valori delle decine di W;
- R è funzione del tipo di abbigliamento e della temperatura delle superfici dell'ambiente: assume valori delle decine di W;
- E è funzione del tipo di abbigliamento e della temperatura, umidità e velocità dell'aria ambiente: può assumere valori che vanno dalla decina di W ad alcune centinaia di W per attività sportive o sforzi intensi.

L'influenza dell'abbigliamento è espressa attraverso la relativa resistenza termica, I_{cl} , usualmente espressa in *clo* dove $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Valori tipici espressi in *clo* sono: 0,5 - 1- 1,5 rispettivamente per abbigliamento estivo, invernale ed invernale pesante.

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:

- . temperatura dell'aria, t_a ,
- . velocità dell'aria, V_a ,
- . temperatura media radiante, t_r ,
- . grado igrometrico o umidità relativa, Φ ,

e due grandezze relative al soggetto:

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

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

2.4.1 Comfort termoigrometrico globale

Quando una persona si trova in un determinato ambiente da un certo tempo, le diverse grandezze del bilancio termico, per effetto dei meccanismi di termoregolazione, tendono ad equilibrarsi, per cui l'accumulo orario tende ad annullarsi; quando l'accumulo si annulla, il corpo umano raggiunge uno stato termico di regime permanente. Il soggetto è in una situazione di grave disagio o addirittura di pericolo se S è diverso da zero quando la temperatura interna raggiunge valori al di sotto di 35 °C (ipotermia) o al di sopra di 38 °C (ipertermia); invece, se S si annulla per un valore della temperatura interna compresa nel suddetto intervallo ($35\text{-}38\text{ °C}$), la condizione è di comfort solo se non sono attivati, o sono attivati solo in maniera lieve, i meccanismi di termoregolazione. In passato si riteneva che condizione necessaria per il benessere termico fosse la non attivazione dei meccanismi di termoregolazione. Si è poi visto che in condizioni di benessere termico non si ha l'attivazione dei meccanismi di termoregolazione solo quando l'individuo non svolge praticamente alcuna attività: all'aumentare dell'attività, anche in condizioni di benessere, si innescano e si intensificano sia il meccanismo vasomotorio che quello della sudorazione.

Negli ambienti termici moderati il problema è quello di valutare l'eventuale scostamento delle condizioni reali da quelle di comfort; tale problema si risolve innanzitutto mediante opportuni indici, gli indici di comfort

globale, funzione dei valori delle sei variabili da cui, come si è visto, dipendono i termini del bilancio termico. Questi indici si dicono globali perché si valutano in funzione dei valori medi spaziali delle quattro variabili ambientali. Lo studio degli ambienti termicamente moderati non si esaurisce con la valutazione degli indici di comfort globale: infatti è necessario anche valutare se sussistono condizioni di discomfort locale, di cui si parlerà al paragrafo successivo.

C'è da sottolineare che gli indici esprimono la risposta media di un gran numero di soggetti, il che significa che, per valori degli indici corrispondenti a condizioni di benessere, ci possono comunque essere individui che avvertono sensazione di caldo o di freddo.

L'indice attualmente più adottato è il PMV (dall'inglese Predicted Mean Vote, in italiano Voto Medio Previsto), proposto da Fanger (1970) 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 punti riportata in Tabella 1.

Voto	Sensazione
+3	molto caldo
+2	caldo
+1	leggermente caldo
0	né caldo né freddo
-1	leggermente freddo
-2	freddo
-3	molto freddo

Tabella 1 – Scala di sensazione termica

Il valore dell'indice PMV si calcola a partire da un sistema di equazioni non semplici, che non si ritiene di riportare in questa breve relazione, nelle quali compaiono i valori misurati o valutati di t_a , V_a , Φ , t_r , M , I_{cl} ; comunque esistono dei software ed apposite tabelle, contenute nella norma citata, che permettono di effettuare facilmente questo calcolo. Mediante questi metodi è possibile, una volta stabilita la destinazione d'uso del particolare ambiente e, quindi, il valore previsto di M e di I_{cl} ricavare i valori dei 4 parametri ambientali in grado di assicurare il raggiungimento delle condizioni di benessere. E' anche possibile, fissando i valori di 5 delle 6 variabili che definiscono l'ambiente termico, ricavare l'influenza della variazione della rimanente sulle condizioni di benessere. Questo tipo di indagini sono estremamente importanti in quanto la

sceita dei parametri ambientali, e del loro range di variabilità, ha notevoli ricadute sui costi di realizzazione e di gestione degli impianti di climatizzazione

In linea di principio la condizione di neutralità termica è caratterizzata da un valore nullo dell'indice PMV. La UNI-EN-ISO 7730 (1997) considera però gli ambienti mediamente confortevoli se caratterizzati da valori di PMV compresi tra - 0,50 e + 0,50^(*).

Come si è detto, il PMV rappresenta il voto di un individuo medio, ovvero la media dei voti espressi da un gran numero di persone poste nello stesso ambiente termico. Sperimentalmente si è visto che i voti dei singoli individui presentano una certa dispersione intorno al valore medio, il che è rappresentativo di insoddisfazione. Fanger definì PPD (dall'inglese Predicted Percentage of Dissatisfied, in italiano Percentuale Prevista di Insoddisfatti) tale percentuale e la correlò al PMV, ottenendo il diagramma di Figura 1, dal quale si evince che la percentuale di insoddisfatti, è pari al 5% per PMV uguale a 0, diventa il 10% ai limiti dell'intervallo di benessere -0,50 - +0,50 e cresce rapidamente all'allontanarsi del PMV dai valori di comfort. Questo risultato evidenzia come le risposte soggettive siano molto diverse tra loro e come sia quindi impensabile realizzare condizioni che siano di comfort per tutti.

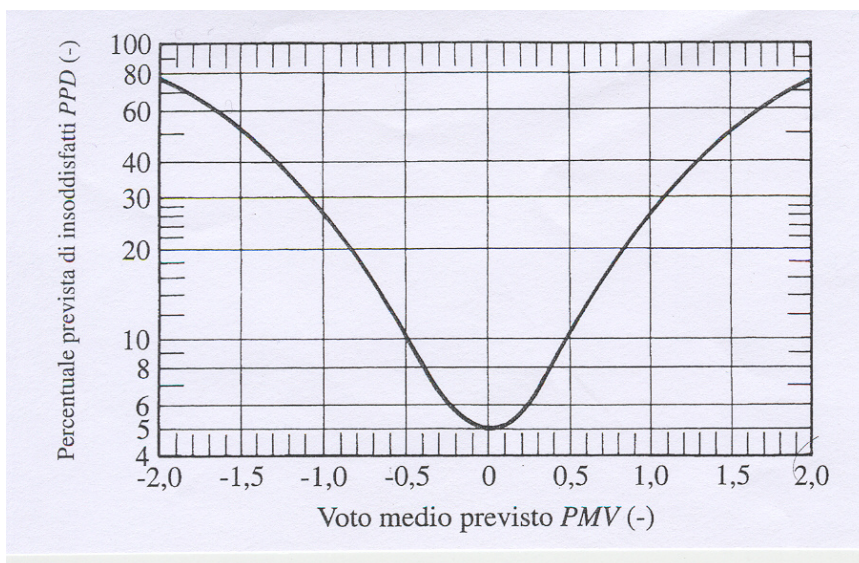


Figura1 Percentuale prevista di insoddisfatti, *PPD*, in funzione del voto medio previsto, *PMV*

(*) La versione più recente della EN-ISO 7730, del 2005, non ancora tradotta in Italiano, prevede, per il comfort per attività sedentarie leggere, tre categorie con valori decrescenti dell'intervallo del PMV: A tra - 0,2 e + 0,2, B tra - 0,5 e + 0,5, C tra - 0,7 e + 0,7.

Nella Tabella 2 sono riportati valori della *temperatura operativa* t_0 , per i quali si rientra nelle condizioni di benessere sopradefinite nel caso di attività leggera, 50% di umidità relativa e velocità media dell'aria $\leq 0,15$ m/s.

Stagione	I_{cl}	t_0 ottimale	Campo di possibile variazione della t_0 per un 10% di insoddisfatti
Inverno	0,9	22°C	20÷23,5°C
Estate	0,5	24,5°C	23÷26°C

Tabella 2 – Valori della temperatura operativa per il benessere

Si noti che, analizzando le equazioni per il calcolo del PMV, risulta che per gli ambienti moderati l'umidità, al contrario delle altre tre variabili ambientali, influisce molto poco sul valore della sensazione termica. In particolare risulta che a parità di valori delle altre variabili, per ottenere lo stesso valore di PMV la t_a deve variare al massimo di 1° C passando da $\Phi = 30\%$ a $\Phi = 70\%$; questi due valori di Φ rappresentano limiti dovuti a motivi indipendenti dalle sensazioni termiche: per valori minori di 0,30 si seccano le mucose con diminuzione delle difese per germi e batteri, per valori maggiori di 0,70 aumentano i rischi di allergie e le probabilità che si formi condensa su punti freddi con conseguente sviluppo di muffe.

2.4.2 Discomfort locale

Come si è detto, gli indici *PMV* e *PPD* danno una valutazione del comfort in funzione dei valori medi delle variabili ambientali, cioè valutano il *comfort globale*. Le condizioni $-0,5 < PMV < +0,5$ e $5\% < PPD < 10\%$ rappresentano pertanto condizioni necessarie ma non sufficienti per il benessere negli ambienti mediamente confortevoli. Perché ci sia effettivamente comfort, infatti, deve essere nullo anche il discomfort dovuto a disuniformità delle variabili ambientali, cioè non deve esserci *discomfort locale*.

Le cause di discomfort locale, prese in considerazione dalla norma citata, sono quattro:

1. *elevata differenza verticale della temperatura dell'aria*: viene prescritto come valore limite accettabile una differenza massima di temperatura di 3°C

- tra le misure ad 1,1 m e 0,1 m dal pavimento (valore limite di insoddisfatti 5%);
2. *pavimento troppo caldo o troppo freddo*: per la sola stagione invernale è considerato accettabile un intervallo di temperatura superficiale del pavimento tra 19°C e 26°C, con la possibilità di arrivare a 29°C in presenza di sistema di riscaldamento a pavimento (valore limite di insoddisfatti 10%);
 3. *correnti d'aria*: il criterio di accettabilità fa riferimento all'indice DR (*Draft Risk*, in italiano *Rischio da Corrente d'aria*), limitandone il valore massimo a 15 : il criterio risulta praticamente sempre soddisfatto per $V_a \leq 0,15$ m/s; (valore limite di insoddisfatti 15%);
 4. *elevata asimmetria media radiante*: per la sola stagione invernale sono fissati i seguenti limiti : con finestre o superfici verticali fredde, in direzione orizzontale < 10°C, per soffitto riscaldato, in direzione verticale < 5°C (valore limite di insoddisfatti 5%).

2.5 Gli ambienti termicamente severi

Gli ambienti termicamente severi sono quelli nei quali, non essendo perseguibile il benessere termoigrometrico, bisogna preoccuparsi della salvaguardia della salute degli occupanti.

Per una classifica degli ambienti termicamente severi può essere utilizzato il valore del PMV.

- se $PMV > + 1$ l'ambiente è definito *severo caldo*
- se $PMV < - 1$ l'ambiente è definito *severo freddo*

L'argomento sarà oggetto di successivi interventi.

Bibliografia essenziale

G.Alfano, F.R. d'Ambrosio, G. Riccio “ La valutazione delle condizioni termoigrometriche negli ambienti di lavoro: comfort e sicurezza ” CUEN, Napoli (1997).

G.Moncada Lo Giudice, L. De Santoli “ Fisica Tecnica Ambientale – Benessere termico, acustico, visivo “ Casa Editrice Ambrosiana, Milano (1990).

*LA MISURA DEL
BENESSERE TERMOIGROMETRICO
E DELLO STRESS TERMICO*



**Università Degli Studi di Cassino
Dipartimento di Meccanica Strutture Ambiente e Territorio**

**STRUMENTI E METODI DI MISURA DEI PARAMETRI AMBIENTALI ED INDIVIDUALI
NELLA VALUTAZIONE DEL BENESSERE E DELLO STRESS TERMOIGROMETRICO**

*M. Dell'Isola, A. Russi
Dipartimento di Meccanica Strutture Ambiente e Territorio
Università degli Studi di Cassino*

Sommario

La misura del benessere termoigrometrico e dello stress termico risulta ancora oggi tra le più complesse probabilmente per la natura soggettiva della sensazione di benessere, per la molteplicità dei parametri ambientali ed individuali ad essa connessa, per la difficile riferibilità di quest'ultime grandezze. I parametri di misura sono inoltre spesso solo correlati alle grandezze termodinamiche e dipendono quindi dalle caratteristiche dimensionali della strumentazione oltre che da parametri di utilizzo come il loro posizionamento. Ciò rende la misura anche difficilmente riferibile alle grandezze del Sistema Internazionale.

In tale lavoro gli autori, descrivono le diverse metodologie di misura dei parametri ambientali ed individuali approfondendo da un lato le molteplici problematiche di misura di questi parametri, dall'altro l'incertezza che metodi, strumenti e riferibilità metrologica determinano sulla misura dei principali indici di benessere e di stress termico.

1. Introduzione

E' oramai universalmente accettato che negli ambienti di lavoro non vadano solamente evitati i rischi termici tipici degli ambienti severi, ma anche i semplici disagi riconducibili ad ambienti moderati. E' infatti dimostrato che il disagio termico è strettamente legato direttamente alla produttività, ma anche alle probabilità di contrarre malattie dell'apparato respiratorio.

Per ottenere condizioni di benessere in un ambiente di lavoro occorre garantire condizioni accettabili dal punto di vista microclimatico, della qualità dell'aria, del livello acustico e di illuminazione. Ciò può essere ottenuto attraverso scambi di massa ed energia con l'ambiente esterno o, quando si renda necessario, attraverso l'utilizzo di appositi dispositivi.

Purtroppo, la valutazione dei rischi o del discomfort da microclima, da qualità dell'aria e da illuminazione è spesso sottovalutata, se non ignorata, nei documenti aziendali realizzati in ottemperanza al D. Lgs.626/94. Ancor più trascurata è l'identificazione e l'attuazione di misure tecniche, organizzative e procedurali volte a migliorare l'ambiente di lavoro.

La ragione di tale approccio è sicuramente dovuta agli elevati costi necessari a mettere in pratica una seria politica del benessere negli ambienti di lavoro, ma è senza dubbio possibile affermare che spesso sia carente una esatta percezione delle condizioni effettive di lavoro sia ai lavoratori che ai datori di lavoro.

Per poter contribuire a colmare questa lacuna, è sicuramente necessario conoscere in modo critico le diverse metodologie di misura dei parametri ambientali ed individuali con particolare riferimento alle problematiche di misura, taratura e certificazione della strumentazione.

In particolare nella valutazione del benessere termoigrometrico e dello stress termico il corpo umano può essere considerato come un sistema termodinamico sul quale è possibile fare un bilancio di energia:

$$S = M - W - E_{res} - C_{res} - E - C - R - K \quad (1)$$

avendo indicato con S il termine di accumulo di energia per unità di tempo; M la potenza sviluppata per attività metabolica; W la potenza meccanica dissipata per attività lavorativa; E la potenza termica per evaporazione nella traspirazione; E_{res} la potenza termica per evaporazione nella respirazione; C_{res} la potenza termica scambiata per convezione nella respirazione; C la potenza termica scambiata per convezione; R la potenza termica scambiata per irraggiamento; K la potenza termica scambiata per conduzione.

Come noto, affinché venga assicurato il comfort termico globale, è necessario che il corpo umano rimanga in condizione di equilibrio omeotermo. In tal caso il termine di accumulo S deve essere nullo ovvero la potenza ceduta all'ambiente deve essere pari alla potenza generata dai processi metabolici. Dall'equazione di bilancio è possibile inoltre dimostrare che, esplicitando tutti i termini del bilancio, l'equazione di benessere risulta una funzione di:

$$S = f(M, I_{cl}, t_a, t_{mr}, v_a, U.R.) \quad (2)$$

Pertanto i parametri che, influenzando gli scambi termici tra individuo e ambiente, determinano le condizioni di benessere, sono i seguenti quattro parametri ambientali:

- la temperatura dell'aria ambiente, t_a (che influenza gli scambi termici convettivi);
- la temperatura media radiante, t_{mr} (che influenza gli scambi termici radiativi);
- la velocità relativa dell'aria, v_a (che influenza gli scambi termici convettivi);
- l'umidità relativa dell'aria, U.R. (che influenza lo scambio evaporativo dal corpo);

ed i seguenti due parametri individuali:

- il dispendio metabolico M (correlato all'attività svolta);
- la resistenza termica conduttiva I_{cl} ed evaporativa del vestiario

Gli ambienti vengono convenzionalmente distinti in moderati (in cui l'obiettivo è il raggiungimento del benessere termoigrometrico) e severi caldi/freddi (in cui l'obiettivo è la sicurezza e la riduzione dello stress termico).

In questa memoria vengono analizzati gli strumenti di misura dei parametri ambientali ed individuale approfondendo da un lato le molteplici problematiche di misura di questi parametri, dall'altro l'incertezza che metodi, strumenti e riferibilità metrologica determinano sulla misura dei principali indici di benessere e stress termico.

In particolare si è fatto riferimento alla norma UNI EN ISO 7726 per i parametri ambientali che descrive in modo dettagliato le caratteristiche degli strumenti di misura di questi parametri. In tabella I vengono sinteticamente riportate le prestazioni metrologiche che la norma fissa per gli strumenti utilizzati nella misura degli indici di benessere (classe C) e degli indici di stress (classe S). La norma suggerisce altresì alcune soluzioni da utilizzare nella valutazione in ambienti eterogenei e condizioni non stazionarie (tabella II). In particolare la norma definisce un ambiente eterogeneo (o non stazionario) quando le variazioni della media spaziale (temporale) per ciascun parametro ambientale sono pari a X volte (tabella II) il valore della corrispondente precisione definita in tabella I.

Si è fatto riferimento invece alle norme UNI-EN ISO 8996 ed UNI EN-ISO 9920 che descrivono le differenti metodologie di misura del tasso metabolico e della resistenza termica del vestiario.

Grandezza	Simbolo	Classe C (benessere)		Classe S (stress termico)	
		Campo di misura	Precisione	Campo di misura	Precisione
Temperatura dell'aria	t_a	10°C ÷ 30°C	Richiesta: ± 0,5 °C Desiderabile: ± 0,2 °C Per $ t_r - t_a = 10^\circ\text{C}$	-40°C ÷ +120°C	Richiesta: -40°C ÷ 0°C: ± (0,5 + 0,01 $ t_a $)°C >0°C ÷ 50°C: ± 0,5°C >50°C ÷ 120°C: ± [0,5 + 0,04($t_a - 50$)]°C Desiderabile: Precisione richiesta/2 Per $ t_r - t_a = 20^\circ\text{C}$
Temperatura media radiante	t_r	10°C ÷ 40°C	Richiesta: ± 2 °C Desiderabile: ± 0,2 °C Quando non possono essere raggiunti indicare il valore effettivo della precisione	-40°C ÷ +150°C	Richiesta: -40°C ÷ 0°C: ± (5 + 0,02 $ t_r $)°C >0°C ÷ 50°C: ± 5°C >50°C ÷ 150°C: ± [5 + 0,08($t_r - 50$)]°C Desiderabile: -40°C ÷ 0°C: ± (0,5 + 0,01 $ t_r $)°C >0°C ÷ 50°C: ± 0,5°C >50°C ÷ 150°C: ± [0,5 + 0,04($t_r - 50$)]°C
Asimmetria della temperatura radiante	Δt_{pr}	0 K ÷ 20 K	Richiesta: ± 1 K Desiderabile: ± 0,5 K	0 K ÷ 200 K	Richiesta: 0 K ÷ 20 K: ± 2 K >20 K ÷ 200 K: ± 0,1 Δt_{pr} Desiderabile: 0 K ÷ 20 K: ± 1 K >20 K ÷ 200 K: ± 0,5 Δt_{pr}
Velocità dell'aria	v_a	0,05 m/s ÷ 1 m/s	Richiesta: ± 0,05+0,05 v_a m/s Desiderabile: ± 0,02+0,07 v_a m/s Per direzione del flusso interna ad un angolo solido pari a 3 π sr	0,2 m/s ÷ 10 m/s	Richiesta: ± 0,1+0,05 v_a m/s Desiderabile: ± 0,05+0,05 v_a m/s Per direzione del flusso interna ad un angolo solido pari a 3 π sr
Umidità assoluta espressa come pressione parziale del vapore d'acqua	p_a	0,5 kPa ÷ 2,5 kPa	± 0,15 kPa Anche per temperature dell'aria e delle pareti uguali o maggiori di 30°C per una differenza $ t_r - t_a $ di almeno 10°C	0,5 kPa ÷ 6,0 kPa	± 0,15 kPa Anche per temperature dell'aria e delle pareti uguali o maggiori di 30°C per una differenza $ t_r - t_a $ di almeno 10°C
Temperatura di bulbo umido a ventilazione naturale	t_{nw}	Usa non raccomandato		0,5 °C ÷ 40 °C	± 0,5 °C
Temperatura di globo	t_g	Usa non raccomandato		20 °C ÷ 120 °C	20 °C ÷ 50 °C: ± 0,5 °C >50 °C ÷ 120 °C: ± 1 °C
Temperatura di globo umido	t_{wg}	Usa non raccomandato		0 °C ÷ 80 °C	± 0,5 °C

Tabella 1

Prospetto 4 - Criteri per un ambiente omogeneo ed a regime permanente (ISO 7726:1998)		
Grandezze	Classe C (comfort) Fattore X	Classe S (stress termico) Fattore X
Temperatura dell'aria	3	4
Temperatura media radiante	2	2
Asimmetria della temperatura media radiante	2	3
Velocità dell'aria media	2	3
Pressione di vapore	2	3

Tabella 2

2. La misura dei parametri ambientali

2.1. La misura della temperatura dell'aria

La temperatura dell'aria influisce sullo scambio termico dell'individuo rispetto all'ambiente circostante in modo significativo soprattutto nelle condizioni di benessere sia in regime invernale che estivo.

La misura della temperatura dell'aria è senza dubbio tra le misure dei parametri di benessere la più consolidata sia per le numerose tecnologie disponibili da quelle tradizionali (i.e. termoresistenze, termocoppie,) a quelle innovative (i.e. a fibra ottica, all'infrarosso), sia per la diffusione della riferibilità metrologica. Gli strumenti di misura utilizzati nelle misure di benessere sono i termometri a resistenza, i termistori, le termocoppie ed i termometri ad espansione di liquido e solido (Figura 1). Tra questi i termometri a resistenza al platino presentano caratteristiche metrologiche (quali l'accuratezza, la stabilità, la linearità) e di utilizzo (quale l'uscita elettrica che consente una più facile applicazione nel controllo automatico degli impianti) che li rendono tra i più utilizzati strumenti.

Le incertezze strumentali tipiche dei termometri a resistenza al platino sono essenzialmente riconducibili a: i) la resistenza dei fili di collegamento; ii) l'autoriscaldamento; iii) le f.e.m. termiche nei collegamenti; iv) la resistenza di isolamento; v) l'incertezza sulla caratteristica e la sua deriva; vi) il tempo di risposta; viii) la profondità di immersione (fattore comune a tutti i metodi di misura per contatto se usati nella misura di fluidi a temperatura diversa rispetto al pozzetto). La norma CEI EN IEC 751 assegna a tali contributi strumentali limiti molto ridotti: per termometri grado I il limite di errore massimo ammissibile è di $\pm(0,15+0,002*|t|)^{\circ}\text{C}$. Valori quest'ultimi ampiamente inferiori a quelli prescritti dalla norma UNI EN ISO 7726 (vedi tabella I). Tale norma prevede infatti per la misura della temperatura dell'aria nella classe C del benessere come "desiderabile" ("richiesto") rispettivamente un errore massimo inferiore a $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) per una temperatura compresa tra $10-30^{\circ}\text{C}$. Per la classe S dello stress termico invece l'errore massimo "richiesto" è di $\pm(0,5+0,01*|t_a|)^{\circ}\text{C}$ per $-40 \leq t \leq 0^{\circ}\text{C}$; di $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ per $0 < t \leq 50^{\circ}\text{C}$; $\pm[0,5+0,04*(t_a-50)]^{\circ}\text{C}$ per $50 < t \leq 120^{\circ}\text{C}$.

Sebbene gli errori massimi ammissibili dalla norma UNI EN ISO 7726 possano apparire molto elevati rispetto alle incertezze strumentali ottenibili ad esempio con i termometri a resistenza, occorre rilevare che specie nella classe S dello stress termico l'effetto delle radiazioni termiche e dell'inerzia termica del sensore possono dar luogo a errori grossolani largamente superiori a quelli ammissibili.

Ad esempio un sensore non opportunamente schermato, in un ambiente caratterizzato da una temperatura media radiante di circa 10°C superiore alla temperatura dell'aria, può misurare con un errore anche superiore ad 1°C . Per ovviare a tale inconveniente si possono adottare i seguenti semplici accorgimenti: i) prevedere uno o più schermi radiativi, ii) lucidare o ricoprire con una vernice riflettente la superficie del sensore per diminuirne l'emittenza, iii) aumentare lo scambio convettivo con l'aria mediante ventilazione forzata o diminuzione delle dimensioni del termoelemento. Dalla Figura 2 è possibile apprezzare l'influenza relativa della temperatura media radiante sulla misura della temperatura dell'aria per un assegnato diametro del sensore e velocità dell'aria.

Per quanto concerne il tempo di risposta (90%) dello strumento in aria, la stessa norma prevede che questo debba essere il più piccolo possibile in entrambe le classi C e S senza specificarne un valore limite. Un tempo di risposta elevato può rappresentare un elemento critico in condizioni non stazionarie (ovvero secondo la norma quando le variazioni delle grandezze in gioco rispetto ai valori medi temporali sono superiori a tre volte, in classe C, e quattro volte, in classe S, la precisione richiesta).

Per poter mantenere un tempo di risposta sufficientemente piccolo è possibile sia ridurre la capacità termica del sensore (dimensioni, densità e calore specifico) che aumentare lo scambio convettivo.

Infine un ulteriore parametro di incertezza è rappresentato dalla disuniformità spaziale della temperatura ovvero secondo la norma quando le variazioni delle grandezze in gioco rispetto ai valori medi spaziali sono quelle sopra indicate per il tempo di risposta. In tal caso la norma prevede la necessità di effettuare una media pesata tra i livelli testa, addome, caviglia quando il posto di lavoro (misura) è fissato nell'ambiente.

Per verificare periodicamente la caratteristica dei termometri a resistenza è possibile utilizzare periodicamente il punto di fusione del ghiaccio e tarare con frequenza almeno biennale presso un centro SIT sull'intero campo di funzionamento del sensore.

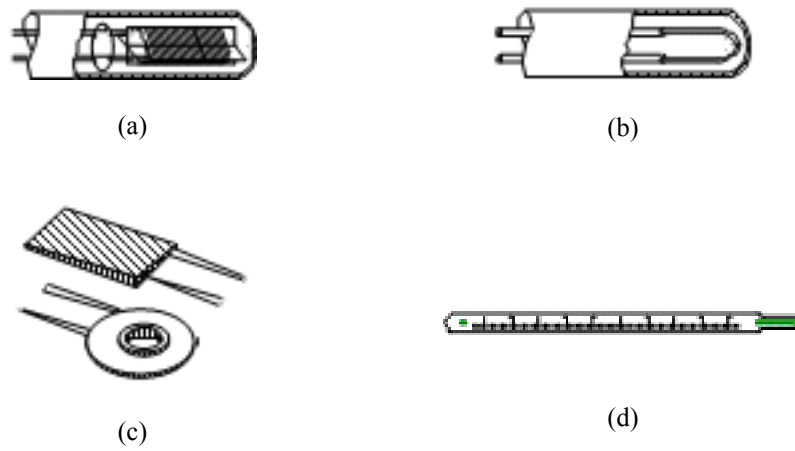


Figura 1 – Strumenti per la misura della temperatura:
 a) termometri a resistenza; b) termocoppie; c) termistori; d) termometri a dilatazione

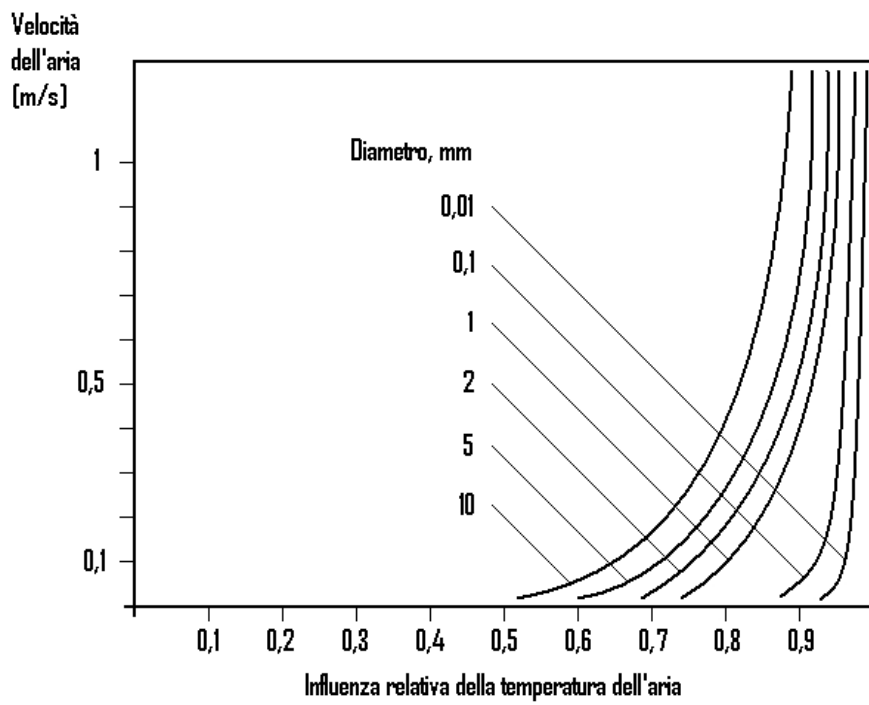


Figura 2 – Effetto della temperatura media radiante nella misura della temperatura dell'aria;

$$E = t_a(X - 1) + t_r(1 - X) \quad (3)$$

2.2. La misura della temperatura media radiante e della asimmetria della temperatura media radiante

Le attuali tecniche di misura ci offrono molteplici possibilità di stimare il discomfort da microclima in termini di carichi radiativi. In particolare i metodi maggiormente utilizzati per la misura della temperatura media radiante sono quello del globotermometro, quello del radiometro, e quello dei fattori di vista (mediante termometri a contatto, termometri a radiazione o mappatura termica).

Di fondamentale importanza ai fini della determinazione del benessere risulta essere anche l'asimmetria della temperatura media radiante che non può essere valutata mediante il globotermometro.

2.2.1. Metodo del globotermometro

Il globotermometro è costituito da una sfera metallica nera opaca (con emittenza pari a 0.95) di assegnato diametro (scelto convenzionalmente pari a 15 cm) all'interno della quale è posizionato un sensore di temperatura (Figura 3a). La forma, la dimensione e l'emissività della sonda sono scelte in modo da simulare il corpo umano ed i relativi scambi convettivi e radiativi, sebbene a rigor di logica la forma ideale sarebbe quella ellissoidale per non sovrastimare le aliquote provenienti da soffitti e pavimento. Forma e dimensioni sono naturalmente un compromesso tra la precisione del modello e semplicità d'uso e costruzione.

Il globotermometro, quindi, non misura un parametro termodinamico ma simula gli scambi radiativi e convettivi del corpo e consente di determinare in condizioni di equilibrio, nota la temperatura e la velocità dell'aria, la temperatura media radiante dell'ambiente in cui esso è collocato.

Il sensore di temperatura posto all'interno del globo consente infatti di determinare la temperatura media raggiunta dal globo in condizioni di equilibrio essendo la temperatura della superficie interna del globo (parete sottile) e la temperatura dell'aria all'interno del globo (spazio chiuso) praticamente uguali alla temperatura media esterna del globo. L'equazione di bilancio dell'energia sul globo in condizioni di regime stazionario restituisce la relazione di misura, infatti essendo il flusso di energia termica scambiato per radiazione tra le pareti dell'ambiente ed il globo, uguale ed opposto al il flusso di energia termica scambiato per convezione fra l'aria ed il globo, ovvero:

$$h_{rg} \cdot (\bar{T}_r^4 - T_g^4) + h_{cg} \cdot (T_a - T_g) = 0 \quad (4)$$

che può anche esprimersi direttamente come:

$$\bar{T}_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{h_{rg}} (T_g - T_a)} \quad (5)$$

Pertanto a seconda del tipo di scambio convettivo, rispettivamente naturale o forzato, nel caso di globo normale ($D=0,15$ m, $\varepsilon=0,95$) si ottengono le relazioni di misura:

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon} \left(\frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (6)$$

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (7)$$

In pratica non conoscendo sempre a priori il tipo di scambio termico è spesso necessario applicare entrambe le relazioni e scegliere il valore di temperatura media radiante che comporta la maggiore differenza di temperatura con l'aria.

La temperatura di globo è un'ottima approssimazione della temperatura operativa definita come:

$$t_o = \frac{h_c \cdot t_a + h_r \cdot \bar{t}_r}{h_c + h_r} = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot \bar{t}_r \quad (8)$$

con A pari rispettivamente a 0.5 (per $w < 0.2$ m/s); 0.6 (per $0.2 < w < 0.6$ m/s); 0.5 (per $w > 0.6$ m/s);

Per contro la misura di globo presenta le seguenti problematiche di misura:

- la misura in un unico punto non è rappresentativa di tutto il campo radiativo relativo al soggetto (soprattutto in presenza di ambienti caratterizzati da radiazione eterogenea); in tal caso sarebbe necessario disporre di diversi globotermometri (a livello testa, addome, caviglie) attribuendo ad ognuno un coefficiente di peso dato (UNI EN ISO 7726).
- il tempo di risposta elevato (circa 20-30 min) non consente di seguire la variazione di temperatura dell'ambiente in modo appropriato (soprattutto in ambienti caratterizzati da repentini cambi di temperatura operativa);
- la differenza di forma tra un individuo e una sfera sovrastimato il carico termico radiativo ricevuto da una persona.
- nel caso di esposizione a radiazioni di piccola lunghezza d'onda (per esempio il sole)
- l'emittenza degli abiti (soprattutto per radiazioni a piccola lunghezza d'onda come ad esempio la radiazione solare) può essere notevolmente diverso da quello del globo; in tal caso è possibile utilizzare (eccetto per la misura del WBGT) una vernice sul globo (grigio medio) con un coefficiente di assorbimento alle radiazioni di piccola lunghezza d'onda che approssima quello della superficie esterna delle persone vestite.

2.2.2. Metodo dei fattori di vista

Il metodo dei fattori di vista calcola la temperatura media radiante sulla base della misura della temperatura superficiale delle pareti circostanti T_{p_i} mediante metodi a contatto o a distanza (Figura 3b) e la stima del fattore di vista tra la persona e le superfici circostanti F_{p-i} . Quest'ultima è una funzione della forma, della grandezza e delle posizioni relative, rispetto alla persona, della superficie.

Nel caso di un corpo inserito all'interno di una cavità con superfici ad emittenza ϵ elevata (come i materiali da costruzione) è possibile trascurare la riflessione e presumere che tutte le superfici dell'ambiente siano nere. In tal caso l'equazione di bilancio può scriversi nel seguente modo:

$$T_r^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + T_3^4 \cdot F_{p-3} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N} \quad (9)$$

I fattori di vista F_{p-i} tra la persona e le superfici circostanti possono essere facilmente valutati sulla base della Figura 4 nel caso di superfici rettangolari posti orizzontalmente o verticalmente rispetto alla persona stessa. E' evidente che essendo tali fattori fortemente influenzati dalla posizione della persona rispetto alle pareti, anche la temperatura media radiante potrà avere (se le temperature delle superfici sono differenti tra loro) un valore diverso in funzione della posizione occupata nella stanza.

Nel caso in cui le differenze di temperatura tra le superfici dell'ambiente sono relativamente piccole, l'equazione precedente può essere semplificata con la seguente:

$$T_r = T_1 \cdot F_{p-1} + T_2 \cdot F_{p-2} + T_3 \cdot F_{p-3} + \dots + T_N \cdot F_{p-N} \quad (10)$$

Il metodo dei fattori di vista presenta rispetto agli altri metodi:

- una migliore accuratezza nella determinazione dei contributi delle diverse pareti alla temperatura media radiante
- la possibilità di stimare anche condizioni di asimmetria
- la difficoltà di calcolare i fattori di vista (specie in geometrie spaziali complesse)
- la difficoltà di misurare la temperatura media superficiale (specie per contatto o per oggetti in movimento)

2.2.3. Metodo della temperatura piana radiante o del radiometro

Il radiometro è costituito da un elemento termico piano con elevata emissività che misura il flusso di energia termica raggiante incidente. L'elemento sensibile è generalmente costituito da una termopila e misura la radiazione incidente sulla base del riscaldamento a cui viene sottoposto la superficie piana dell'elemento sensibile stesso mantenuto alla temperatura dell'aria. La temperatura del sensore T_s è allora direttamente correlata alla temperatura piano radiante T_{pr} secondo la seguente equazione di bilancio se è possibile trascurare gli scambi convettivi con l'aria e conduttivi con il supporto:

$$\alpha_s \sigma \cdot T_{pr}^4 = \epsilon_s \sigma \cdot T_s^4 - \dot{q}_s \quad (11)$$

Per questo motivo l'elemento sensibile viene protetto con una finestra emisferica in polietilene trasparente sull'infrarosso. E' possibile peraltro misurare la sola aliquota raggiante direttamente in aria anche mediante un sensore riscaldato costituito da due dischi uno perfettamente riflettente (placcato in oro) l'altro assorbente (verniciato nero) mantenuti alla medesima temperatura. In tal modo infatti uno sarà sensibile al solo scambio convettivo l'altro ad entrambi e misurare per differenza la sola aliquota radiativi.

La temperatura media radiante può allora essere valutata misurando la temperatura piana radiante T_{p-i} nelle sei direzioni dello spazio ed i fattori di area proiettata A_{p-i} (

Figura 5) per una persona nelle stesse sei direzioni dello spazio (1)sopra; 2)sotto; 3)sinistra; 4)destra; 5) avanti; 6)dietro) secondo la relazione:

$$T_{mr} = \frac{\sum_{i=1-6} T_{p-i} \cdot A_{p-i}}{\sum_{i=1-6} A_{p-i}} \quad (12)$$

Anche mediante questo metodo è possibile facilmente valutare con ottima precisione l'asimmetria radiante. Inoltre attraverso una particolare sonda denominata radiometro netto è possibile questa valutazione anche in modo diretto.

Il radiometro netto è costituito da un elemento piano nero, con un misuratore del flusso di energia termica (termopila) tra le due facce dell'elemento. Il flusso netto di energia termica tra le due facce è uguale alla differenza tra gli scambi termici radiativi delle due facce dell'elemento. Gli elementi di misura sono entrambi ricoperti da una sottile sfera di polietilene per diminuire l'effetto della velocità dell'aria e conseguentemente, dello scambio convettivo.

La radiazione netta è data dalla seguente equazione:

$$\dot{q}_r = \sigma \cdot (T_{pr1}^4 - T_{pr2}^4) = 4\sigma \cdot T_n^3 \cdot \Delta T_{pr} \quad (13)$$

avendo indicato con ΔT_{pr} l'asimmetria della temperatura radiante e T_n uguale alla media delle temperature piano radianti o approssimativamente alla temperatura del radiometro netto.

Per verificare periodicamente la curva caratteristica dei radiometri è possibile utilizzare delle cavità e/o calotte mantenute a temperatura costante. In ogni caso è necessario tarare almeno con cadenza biennale questi strumenti presso centri metrologici.

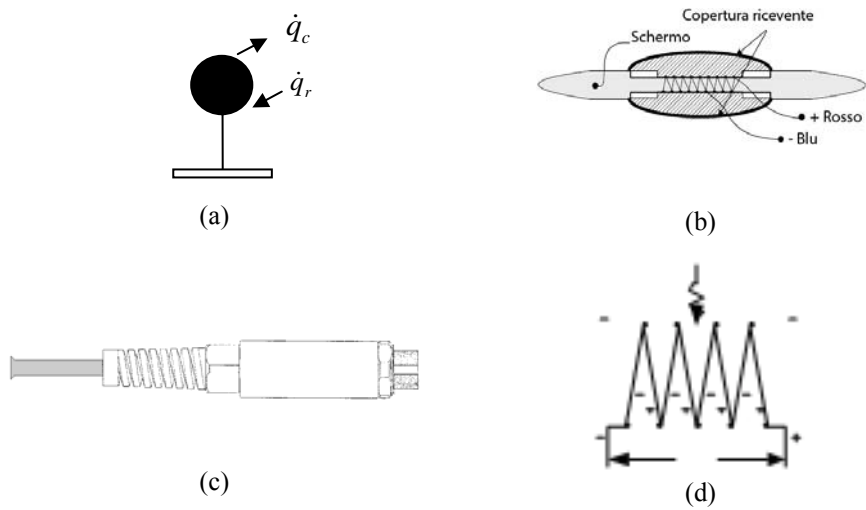


Figura 3 Strumenti di misura della temperatura media radiante:
 a) globotermometro; b) radiometro netto; c) termometro a contatto; d) termometro a radiazione

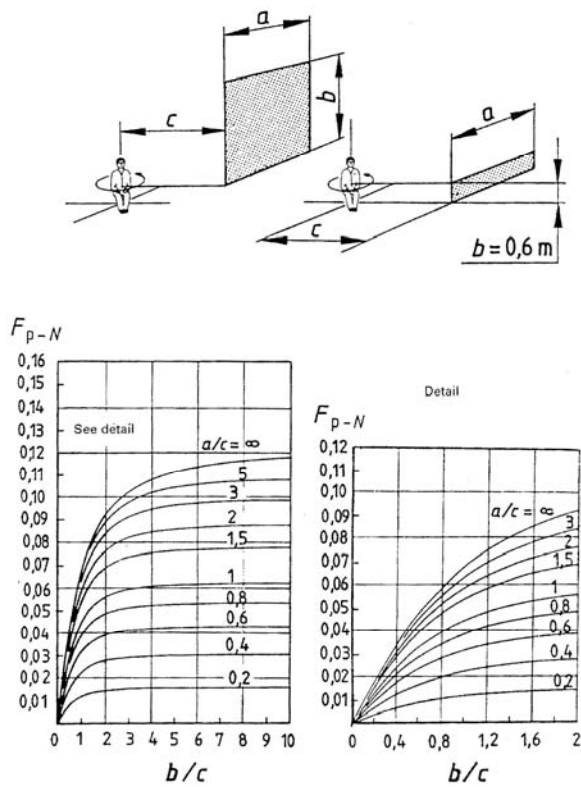
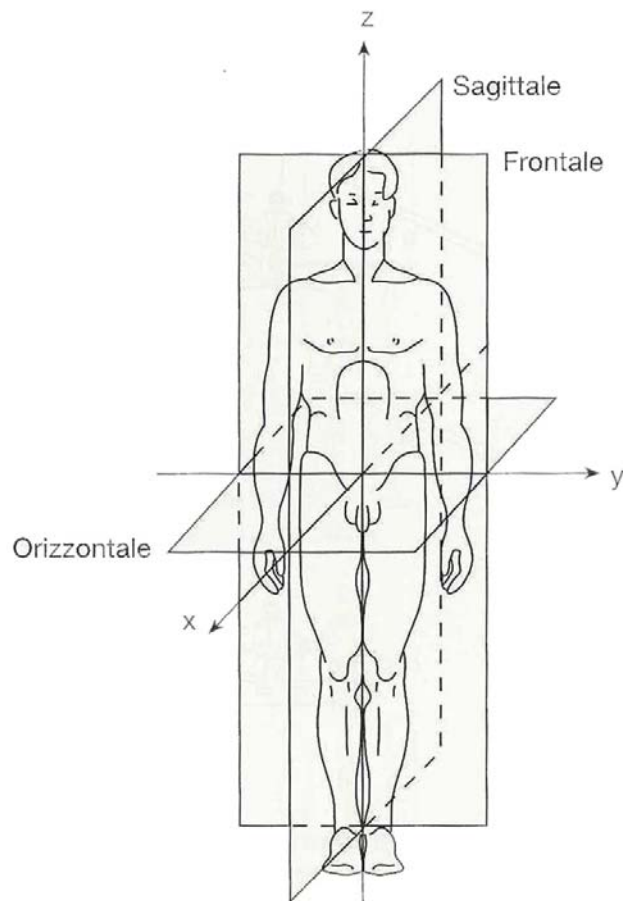


Figura 4 - Metodo dei fattori di vista (Fanger, 1970)



Fattori di area proiettata per una persona seduta o in piedi, secondo gli assi di una terna cartesiana con l'origine nel soggetto, l'asse z verticale e con l'asse x orizzontale e perpendicolare al piano frontale			
Posizione	Fattore di area proiettata lungo l'asse		
	X	Y	Z
In piedi	0,35	0,23	0,08
Seduto	0,3	0,22	0,18

Figura 5 Fattori d'area proiettati nei diversi piani di riferimento (Fanger, 1970)

2.3. La misura dell'umidità dell'aria

L'umidità assoluta dell'aria influisce in modo determinante nel bilancio termogravimetrico di un individuo sulle aliquote trasmissive per evaporazione (E) infatti un'elevata umidità dell'aria riduce drasticamente l'evaporazione del sudore. Generalmente questa aliquota può rappresentare in regime estivo anche il 70-80% dell'intero scambio termico L, per tale motivo la misura dell'umidità non può essere trascurata o considerata marginale (come spesso purtroppo accade) se si vogliono valutare accuratamente le condizioni di benessere o di stress termico.

Quando si parla della misura dell'umidità è spesso possibile fare confusione perché generalmente gli strumenti di misura disponibili misurano parametri fisici molto diversi tra loro sebbene tra essi correlati

Tabella 3.

Gli igrometri relativi (Figura 6a), come ad esempio gli igrometri a capello, gli igrometri elettrici capacitivi e resistivi, misurano direttamente l'umidità relativa definita come il rapporto tra la pressione parziale del vapore p_v e la pressione di saturazione del vapore alla temperatura ambiente T_a :

$$UR = \frac{p_v}{p_{vs}(t_a)} \quad (14)$$

Questi igrometri sono probabilmente i sensori tecnologicamente e funzionalmente più semplici, pertanto essi presentano un costo relativamente basso. Negli ultimi anni la ricerca di nuovi materiali ha portato ad un sensibile incremento dell'affidabilità dei sensori igroscopici relativi, in special modo di quelli di tipo elettrico, consentendone un'ampia applicazione in ambito industriale e di laboratorio. Il principio di misura (meccanico, elettrico, a risonanza, ecc), le tecnologie di produzione (a film sottile, a film spesso, a stato solido, ecc.) ed i materiali utilizzati (polimerici, ceramici, ecc.) sono i più svariati consentendo di misurare l'umidità relativa in un ampio campo di misura 10-100%UR con un'incertezza tipicamente del 2-3% ed nel migliore dei casi inferiore allo 0.5%. I punti critici di questi sensori sono essenzialmente riconducibili alla sensibilità alla temperatura (che li rende inadatti soprattutto per misure accurate ad elevate temperature) e lo sporcamento/contaminazione superficiale (che li rende critici per misure continuative in ambienti di lavoro senza opportuni filtri di protezione). Inoltre per ottenere la misura dell'umidità assoluta è necessario conoscere il valore della temperatura dell'aria.

Gli igrometri a specchio condensante (Figura 6b) misurano la temperatura di rugiada, direttamente proporzionale alla pressione parziale del vapore p_v e quindi al titolo w :

$$p_v = p_{vs}(t_r) \quad (15)$$

$$w = 0.612 \frac{p_v}{(P - p_v)} \quad (16)$$

Il principio di misura dello strumento si basa su una trasformazione di raffreddamento isotitolo e isobara fino al raggiungimento delle condizioni di saturazione (rilevata solitamente mediante un sensore ottico). Sebbene gli igrometri a condensazione siano funzionalmente gli igrometri più complessi e costosi (anche per la necessità di prelevare un flusso continuo di aria umida), essi sono anche i più accurati consentendo di misurare la temperatura di rugiada da valori bassissimi di -100°C fino alla temperatura dell'aria con incertezze anche inferiori a 0.1°C . Per questo motivo essi vengono per lo più utilizzati in laboratorio come campioni di trasferimento o per misure di elevata precisione. I principali limiti consistono negli elevati tempi di risposta (soprattutto per variazioni repentine dell'umidità) e lo sporcamento superficiale dello specchio. Recentemente sono apparsi sul mercato igrometri a condensazione "in situ" con incertezze tipiche più elevate ma con costi sensibilmente ridotti.

Gli psicrometri (Figura 6c) misurano la temperatura di bulbo umido t_{bu} , ovvero la temperatura di saturazione alla quale si porta un sensore ricoperto da un garza sempre umida sottoposta a ventilazione forzata (velocità dell'aria tipicamente compresa tra 3 e 5m/s). Questa grandezza sebbene praticamente coincidente con la temperatura di bulbo umido termodinamica (anche denominata temperatura di saturazione adiabatica) non va confusa con essa in quanto non è una proprietà termodinamica e può variare in modo significativo in funzione del tipo di costruzione dello strumento (tipo di schermatura, tipo di ventilazione e velocità dell'aria, spessore e tipo di garza).

Lo psicrometro è costituito da due termometri di cui il primo termometro misura la temperatura dell'aria, t_a anche detta temperatura "a bulbo asciutto" dell'aria in contrapposizione alla temperatura "a bulbo umido" indicata dal secondo termometro. Il termometro a bulbo umido è come già detto avvolto da una garza bagnata (generalmente fatta di cotone a maglia stretta) la cui estremità è posta in un serbatoio d'acqua che risale per capillarità fino al termometro e quindi evapora. La portata d'acqua evaporata è ovviamente funzione dell'umidità dell'aria e determina un raffreddamento del termometro tanto maggiore quanto più l'aria è secca. Sulla base del bilancio di energia sul bulbo è possibile desumere la classica relazione psicrometrica avendo indicato con A la costante psicrometrica del sensore:

$$p_v = p_{vs}(t_{bu}) - AP(t - t_{bu}) \quad (17)$$

$$w = 0.612 \frac{p_v}{(P - p_v)} \quad (18)$$

Anche da tale relazione emerge che lo psicrometro a ventilazione forzata Figura 6c non va confuso con quello a ventilazione naturale Figura 6d in quanto essendo molto diverso il coefficiente di scambio termico in convezione naturale, diversa sarà la costante psicrometrica.

Sebbene lo psicrometro abbia rappresentato per decenni lo strumento di misura dell'umidità per antonomasia per tutti i termotecnici, la complessità della misura e le numerose problematiche di utilizzo quali la dipendenza dallo sporco della garza e dello schermo radiativo, dalla temperatura dell'acqua di alimentazione, dalla velocità di aspirazione ne hanno limitato notevolmente l'utilizzo.

La precisione richiesta per la misura dell'umidità sia per la classe C benessere (da 0,5 a 2,5 kPa), sia per la classe S stress termico (da 0,5 a 6,0 kPa) è $\pm 0,15$ kPa. Questo valore deve essere garantito anche per temperature dell'aria e delle pareti uguali o maggiori di 30°C e per una differenza $|t_r - t_a|$ di almeno 10°C.

Per verificare periodicamente la caratteristica degli igrometri è possibile utilizzare periodicamente mediante i punti fissi delle soluzioni saline sature e tarare con frequenza almeno biennale presso un centro SIT il sensore.

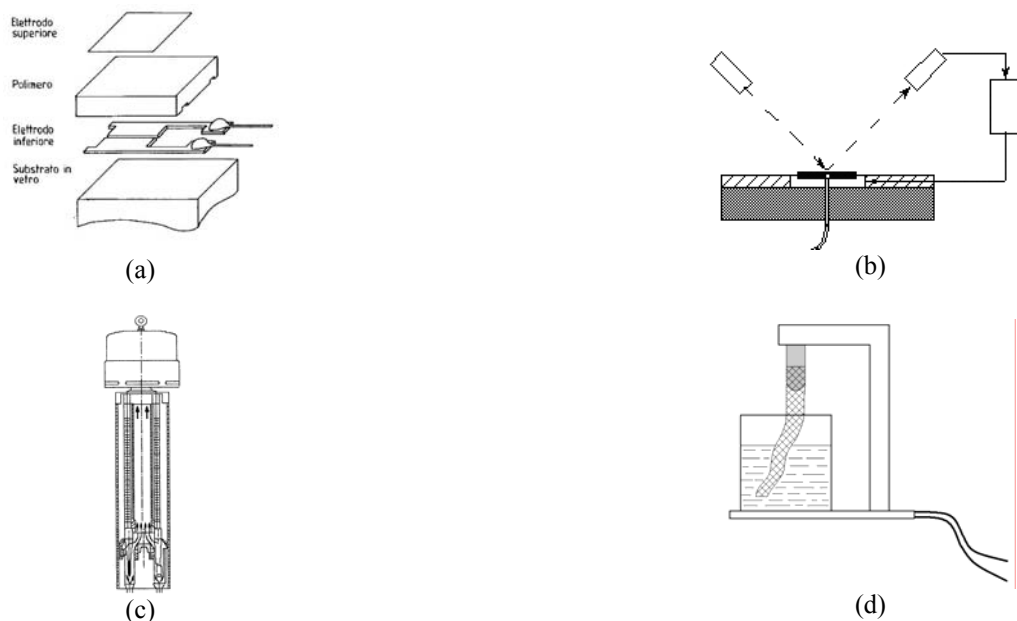


Figura 6 Strumenti di misura dell'umidità:

a) Igrometri relativi; b) Igrometri a condensazione; c) psicrometri a ventilazione forzata; d) psicrometro a ventilazione naturale

Sensore	Parametro	Campo di misura	Campo di temperatura	Incertezza di misura	Tempo di risposta	Montaggio	Tipo di Misura	Vantaggi e svantaggi
Igrometro Meccanico	ϕ	20÷90%UR	20°C (0÷40°C)	5÷15%UR	2-5 min	in ambiente immersione	diretta (relativa)	<i>vantaggi</i> - basso costo - semplicità costruttiva <i>svantaggi</i> - frequente calibrazione - isteresi - sensibilità alle vibrazioni
Igrometro resistivo	ϕ	5÷95%UR (fino a 100%)	-10÷60°C (-40÷200)	2÷5%UR	10÷100 s	in ambiente immersione	diretta (relativa)	<i>vantaggi</i> - dimensioni ridotte - elevata sensibilità <i>svantaggi</i> - frequente calibrazione - contaminazione superfic. - sensibilità alla temperat. - sensibilità alle vibrazioni
Igrometro Capacitivo	ϕ	5÷99%UR (fino a 100%)	-10÷60°C (-40÷200)	2÷3%UR	10÷100 s	in ambiente immersione	diretta (relativa)	<i>Vantaggi</i> - dimensioni ridotte <i>svantaggi</i> - contaminazione superfic. - sensibilità alla temp.
Igrometro a rilevazione di impedenza di Al ₂ O ₃	ppm _v (T _r)	0.01÷200.000 (-110÷60°C)	-30÷60°C	2÷3%V.L. (2÷5°C)	10÷20 s	immersione.	diretta (assoluta)	<i>vantaggi</i> - utilizzabile per liquidi - bassi tempi di risposta <i>svantaggi</i> - contaminazione superfic. - sensibilità alla temp.
Igrometro elettrolitico (P ₂ O ₅)	ppm _v (T _r)	0.1÷1.000 (-90÷-20°C)	20°C (0÷40°C)	5÷10%V.L.	2-3 min	prelevamento	indiretta (assoluta)	<i>vantaggi</i> - utilizz. per gas secchi <i>svantaggi</i> - contaminazione - sensibilità alla temperat. - controllo portata di aria
Igrometro a condensazione con rilevazione ottica	T _r	-100÷100°C	-20÷60°C	0.1÷0.5°C	1°C/s	prelevamento o immersione	indiretta (assoluta)	<i>Vantaggi</i> - ottima precisione - misura a prelevamento <i>svantaggi</i> - complessità costruttiva - contaminazione specchio - elevato costo - elevati tempi di risposta
Igrometro a condensazione con sali saturi (LiCl)	T _r	-40÷60°C	-20÷60°C	0.5÷1.5°C	1-2 min	immersione	indiretta (assoluta)	<i>Vantaggi</i> - bassa contaminazione - basso costo <i>svantaggi</i> - frequenza taratura - bassa affidabilità
Psicrometro	ϕ (T _s , T _a)	10÷100%UR	5÷60°C	1÷5%UR (0.2÷10°C)	1-2 min	in ambiente	indiretta (relativa)	<i>vantaggi</i> - semplicità costruttiva - misura termodinamica <i>svantaggi</i> - fortemente intrusivo - non adatto basse temper. - non adatto basse umidità - contaminazione garza

Tabella 3- Caratteristiche metrologiche tipiche dei sensori di umidità dell'aria industriali

2.4. La misura della velocità dell'aria

La velocità dell'aria condiziona in modo indiretto sia lo scambio termico convettivo che evaporativo in quanto la velocità media ed il livello di turbolenza modificano in modo significativo il coefficiente di scambio termico convettivo e di massa. La sensibilità alla velocità è particolarmente elevata negli ambienti freddi dove gli scambi convettivi prevalgono rispetto a quelli radiativi.

La misura della velocità dell'aria è generalmente alquanto complessa sia per la sua rapida fluttuazione temporale (variabilità dell'intensità) sia per la sua natura vettoriale (variabilità della direzione). Dal punto di vista dello scambio termico come già detto piuttosto che il valore istantaneo e la direzione del flusso ha una fondamentale incidenza il valore medio del modulo della velocità dell'aria.

Le sonde cosiddette "omnidirezionali" consentono di misurare con una buona accuratezza il modulo della velocità indipendentemente dalla loro collocazione. Si noti però che, anche nel caso di sonde omnidirezionali, la variazione della direzione della velocità dell'aria ha comunque l'effetto di una corrente d'aria sulla sensazione soggettiva. Le sonde monodirezionali devono invece essere collocate ortogonalmente al flusso o devono essere in numero superiore ad uno per consentire la misura delle singole componenti della velocità. In generale, il modulo della velocità dell'aria può essere quindi determinato utilizzando una sola sonda omnidirezionale che è direttamente sensibile all'intensità della velocità qualunque sia la sua direzione (ad esempio una sonda a bulbo caldo) oppure utilizzando tre sensori direzionali che permettono di misurare le componenti della velocità dell'aria lungo i tre assi perpendicolari (V_x, V_y, V_z) e quindi la velocità mediante la relazione:

$$v_{\text{media}} = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} \quad (19)$$

Nel caso in cui il flusso d'aria è unidirezionale, è possibile anche utilizzare una sola sonda monodirezionale (come un anemometro a filo caldo) rilevando la direzione dell'aria eseguendo prove con il fumo o con l'anemometro stesso.

La norma UNI EN ISO 7226 considera nella scelta di un anemometro le seguenti tre caratteristiche: i) la sensibilità del sensore alla direzione del flusso; ii) la sensibilità del sensore alle variazioni di velocità dell'aria; iii) la possibilità di ottenere una velocità media relativamente ad un certo periodo di tempo.

Nella misura del benessere è quindi possibile utilizzare anemometri a filo/film caldo, anemometri a mulinello (a palette o a coppe) ed anemometri ad ultrasuoni ma occorre sempre valutare preventivamente la sensibilità alla direzione ed il tempo di risposta dello strumento e quindi valutare le possibilità di utilizzo.

Negli anemometri a filo (Figura 7a) e a film caldo (Figura 7b) la misura della velocità si basa sulla misurazione dello scambio di energia termica tra l'elemento sensibile e l'aria dell'ambiente. L'anemometro è costituito da un corpo solido che nel caso dei sensori a filo ha geometricamente la forma di un cilindro e nel caso dei sensori a film può avere forme diverse come una sfera o altro. Il corpo del sensore viene riscaldato elettricamente ad una temperatura maggiore di quella dell'aria cedendo energia termica all'ambiente circostante principalmente per convezione:

$$q_c = h_c \cdot (t_c - t_a) \quad (20)$$

avendo indicato con q_c la potenza termica ceduta dall'elemento, h_c è il coefficiente di scambio convettivo tra l'elemento e l'aria (funzione della velocità dell'aria V_a ; t_c la temperatura dell'elemento; t_a è la temperatura dell'aria).

La taratura preliminare dell'apparecchio fa sì che questo scambio di energia termica sia convertito in velocità dell'aria. La potenza di riscaldamento dell'elemento e le temperature dell'elemento e dell'aria permettono di determinare la velocità dell'aria mediante il coefficiente di scambio termico convettivo.

Teoricamente tutti gli anemometri ad elemento caldo dovrebbero avere quindi due sensori di temperatura, uno per misurare la temperatura dell'elemento caldo e l'altro per la misurazione della temperatura dell'aria. In alcuni strumenti più semplici manca il sensore di temperatura dell'aria, ma possono funzionare solo alla temperatura t_a per la quale sono stati tarati. Negli anemometri CCA a corrente costante la potenza termica q_c fornita inoltre è costante e quindi la semplice misurazione della temperatura t_c dell'elemento permette di determinare la velocità dell'aria V_a . Negli anemometri CTA la temperatura t_c si mantiene costante e la misurazione della potenza fornita all'elemento per mantenere tale temperatura permette di determinare la velocità dell'aria V_a .

La misura della temperatura dell'elemento caldo t_c , infine, può essere in alcuni casi misurata direttamente dalla variazione della resistenza dell'elemento sensibile filo/film con la temperatura, in altri misurata indirettamente da un sensore di temperatura a contatto con esso (ad esempio una termocoppia).

Gli anemometri a sfera calda hanno una ridotta sensibilità alla direzione del flusso d'aria mentre gli anemometri a filo caldo hanno una maggiore sensibilità alla direzione del flusso di aria. In tal caso l'uso di tre fili caldi sistemati ortogonalmente, consente di determinare sia la direzione che il modulo della velocità dell'aria.

Gli anemometri "a mulinello" (Figura 7c) sono costituiti da una piccola girante (a pale sottili o a coppelle) opportunamente sospesa nella corrente fluida, con il suo asse di rotazione coassiale o perpendicolare alla direzione del flusso, rispettivamente, per velocità elevate (in ambienti esterni) o medio/piccole (in ambienti interni). Essi sono pertanto sensori unidirezionali dove è necessario conoscere preventivamente la direzione del vettore velocità. In tal modo il vettore velocità del fluido ha solo componenti lungo l'asse di rotazione e forma un angolo con la tangente alla pala nel punto di contatto, detto angolo di incidenza. L'impatto del fluido sulla pala provoca quindi la deviazione degli stessi filetti fluidi, che lasceranno il rotore secondo un moto vorticoso di swirl, mentre quest'ultimo, per effetto della spinta esercitata, ruoterà ad una velocità angolare ω proporzionale (secondo una costante K caratteristica di ciascun

misuratore e in prima approssimazione indipendente dalle proprietà del fluido) alla velocità media del fluido secondo la relazione:

$$v = K \cdot \omega \quad (21)$$

La palettatura (in genere di diametro compreso tra i 25 e i 70 mm) effettua una media della componente assiale della velocità dei singoli filetti di corrente (integrazione) su tutta la sezione della palettatura stessa. Gli anemometri "a mulinello" possono essere quindi utilizzati per rilievi di velocità media dell'aria in campo ambientale tanto in ambienti chiusi che all'aperto.

Gli anemometri ad ultrasuoni (Figura 7d) utilizzano per la rilevazione della velocità dell'aria alcune particolari fenomenologie connesse alla propagazione di onde ultrasonore attraverso un fluido in moto. Essi, sulla base del principio fisico utilizzato, possono essere suddivisi in misuratori a tempo di transito ("Time-of-flight flowmeters", TOF) e misuratori ad effetto Doppler ("Doppler ultrasonic flowmeters"). In entrambi si sfrutta la propagazione di onde di pressione a frequenze superiori (di solito ~10 MHz) a quelle udibili dall'orecchio umano e che si propagano all'interno della corrente fluida con velocità pari alla velocità relativa del suono nel mezzo c_0 . La vibrazione indotta nel cristallo trasmettitore dall'applicazione di una d.d.p. su di esso, si propaga attraverso il fluido raggiungendo il cristallo ricevente che "eccitato" produrrà un segnale elettrico proporzionale alla velocità dell'aria.

Nei misuratori a tempo di transito, l'informazione sulla velocità media del fluido \bar{w} , e quindi sulla portata in volume, si ottiene dalla misura del tempo di propagazione t delle onde ultrasonore dal trasmettitore al ricevitore che, nella classica configurazione, sono posizionati su opposte pareti a distanza L e direzione obliqua e prefissata rispetto alla direzione del moto (cioè all'asse del condotto) individuata dall'angolo ϕ ($\cos\phi=D/L$).

Il tempo di propagazione è quindi la velocità media sono espressi dalle relazioni:

$$t = \frac{L}{c_0 + \bar{w} \cdot \cos\phi} \quad (22)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{\cos\phi} \left(\frac{L}{t} - c_0 \right) \quad (23)$$

La precisione richiesta per la classe C benessere (da 0,05 a 1m/s) è di $\pm|0,05+0,05*wa|$ m/s; il tempo di risposta (90%) richiesto è di 1s. Per la classe S stress termico (da 0,2 a 10 m/s) è di $\pm|0,1+0,05*Va|$ m/s; il tempo di risposta (90%) richiesto deve essere il più piccolo possibile.

Tranne che nel caso in cui la corrente d'aria sia unidirezionale, il sensore della velocità dell'aria deve misurare efficacemente la velocità qualunque sia la velocità dell'aria. E' altresì auspicabile una indicazione del valore medio per un periodo di 3 min.

Per verificare periodicamente la caratteristica degli anemometri è possibile utilizzare misuratori di velocità più precisi quali tubi di Pitot e tarare con frequenza almeno biennale presso un centro SIT l'anemometro. Purtroppo in Italia ancora non è possibile dare efficacemente riferibilità a tali strumenti, ma i recenti sforzi effettuati dall'INRIM e da alcuni centri di metrologia lasciano ben sperare nel breve periodo.

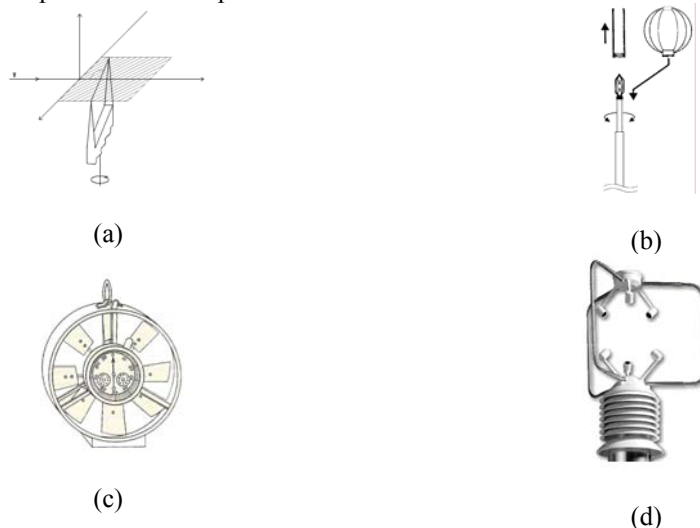


Figura 7- Strumenti di misura della velocità:

- a) anemometro a filo caldo; b) anemometro a film caldo omnidirezionale a sfera;
c) anemometro a mulinello; d) anemometro ad ultrasuoni 3D

3. La misura dei parametri individuali

3.1. La stima della resistenza termica dell'abbigliamento

L'isolamento termico dell'abbigliamento dipende soprattutto dallo spessore e dalla porosità di ogni strato che lo compone, oltre che dalla superficie corporea coperta. L'abbigliamento agisce infatti ostacolando sia gli scambi termici per convezione, conduzione e irraggiamento, sia quelli latenti per evaporazione.

L'isolamento termico base (o intrinseco del vestiario) I_{cl} viene genericamente definito mediante la relazione:

$$I_{cl} = \frac{\bar{t}_{sk} - \bar{t}_{cl}}{H} \quad (24)$$

avendo indicato con: \bar{t}_{sk} la temperatura media della pelle, [°C]; \bar{t}_{cl} la temperatura media della persona vestita (incluse le parti scoperte), [°C]; H la potenza termica secca (scambiata per convezione C e irraggiamento R) per unità di superficie, [W/m²].

In altre parole l'isolamento termico dell'abbigliamento può essere definito come la resistenza termica equivalente che disposta uniformemente su tutto il corpo scambia con l'ambiente esterno (supposto sempre a temperatura uniforme e regime permanente) una potenza termica "secca" pari a quella effettiva.

L'isolamento termico dell'abbigliamento viene espresso nel SI in [m²K/W], ma è molto diffusa l'abitudine di esprimere tali resistenze nell'unità incoerente "[clo]" pari a 0,155 m²K/W. Tipicamente l'abbigliamento estivo ha una resistenza termica compresa tra 0,4 e 0,7 clo, mentre l'abbigliamento invernale ha una resistenza compresa tra 0,8 e 1,2 clo.

I metodi per la misura dell'isolamento termico sono complessi e poco diffusi in quanto necessitano di camere climatizzate con il controllo della temperatura operativa, dell'umidità relativa e della velocità dell'aria (mantenuta generalmente prossima a zero). Il metodo di prova utilizza manichini riscaldati mantenuti immobili e consente di determinare in tal modo lo scambio termico "secco". Generalmente nelle valutazioni ergonomiche ed ambientali è sufficiente disporre di valori approssimati facendo ricorso a tabelle che consentono di determinare l'isolamento termico in base alla tipologia del vestiario o ai singoli indumenti indossati.

La norma UNI EN ISO 9920:1995 illustra due differenti metodi per la valutazione tabellare dell'isolamento termico del vestiario: i) il primo, più semplice, utilizza tabelle che riportano i valori di resistenza termica relativi a vestii quotidiani o da lavoro in modo aggregato ed esemplificato (Tabella 5) oppure sempre in modo aggregato ma dettagliando la tipologia, la massa ed il fattore d'area del vestiario f_{cl} definito come il rapporto tra l'area della persona vestita e quella nuda (Tabella 6); ii) il secondo, più complesso, utilizza tabelle che riportano i valori di resistenza termica di singoli indumenti quotidiani o da lavoro che tengono in debito conto sia delle caratteristiche del singolo capo che del tipo di tessuto con cui è realizzato; l'isolamento termico efficace totale può essere quindi calcolato mediante la semplice relazione:

$$I_{cl} = \sum I_{cl,u} \quad (25)$$

dove l'isolamento termico efficace dei singoli indumenti $I_{cl,u}$ può essere valutato come differenza tra la resistenza totale I_T e quella superficiale I_a ipotizzando un semplice meccanismo di scambio termico in serie sulla base della relazione:

$$I_{cl,u} = I_T - I_a = \frac{\bar{t}_{sk} - \bar{t}_o}{H} - \frac{1}{\bar{h}_c + \bar{h}_r} \quad (26)$$

avendo indicato con \bar{h}_c ed \bar{h}_r rispettivamente la conduttanza termica convettiva e radiativa unitaria del soggetto con l'ambiente e \bar{t}_o la temperatura media operativa.

Si noti che l'isolamento termico efficace differisce sostanzialmente da quello intrinseco del vestiario a causa del fattore d'area del vestiario (che tiene conto del fatto che per un soggetto vestito l'area della superficie di scambio può essere sostanzialmente diversa da quella dello stesso soggetto nudo) e può essere ricondotto a questo sulla base delle relazioni:

$$I_{cl} = I_T - \frac{I_a}{f_{cl}} \quad (27)$$

$$I_{cl} = I_{cle} + I_a \left(1 - \frac{1}{f_{cl}} \right) \quad (28)$$

I principali limiti della valutazione tabellare non risiedono nell'impossibilità di definire con precisione il vestiario utilizzato, ma piuttosto nelle condizioni di riferimento a cui tali dati si riferiscono, ovvero di regime permanente, flusso monodimensionale e condizioni di immobilità del soggetto.

Queste condizioni raramente si realizzano sia per la presenza di una velocità dell'aria quasi sempre diversa da zero (per il cosiddetto "pumping effect") dovuta al movimento dell'individuo, l'aria penetrando attraverso gli abiti (trame dei tessuti, polsini, colletti, ecc.) asporta energia termica dalla superficie del corpo riducendo l'isolamento termico effettivo dell'abbigliamento rispetto alle condizioni di immobilità, sia per la geometria del sistema corpo-abbigliamento ovvero per la disuniformità con cui l'abbigliamento ricopre il corpo e che determina conseguentemente una disuniformità termica della pelle.

Abbigliamento completo (tabella A2 ISO 9920)					
N°	Abbigliamento completo	Massa (g)	f _{cl}	I _{cl}	
				clo	m ² C/W
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Pantaloni, camicia					
100	Mutande 8, maglietta 30, pantaloncini 364, calzini al polpaccio 264, scarpe da ginnastica 262	318	1.1	0.33	0.051
101	Mutande 1, Cappello a cilindro 69, pantaloni corti 99, sandali 272	258	1.07	0.23	0.036
102	Mutande 8, maglia a maniche corte 79, pantaloni corti 97, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	622	1.11	0.41	0.064
103	Mutande 8, maglia con maniche a 3/4 66, pantaloni corti 97, calzini 263, scarpe da ginnastica 260	451	1.17	0.52	0.081
106	Mutande 1, camicia a maniche corte 68, pantaloni aderenti 102, sandali 272	523	1.14	0.44	0.068
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Pantaloni, maglione					
104	Mutande 8, camicia a maniche corte 77, pantaloni corti 97, maglione con collo a V 136, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	765	1.13	0.63	0.098
105	Mutande 1, camicia 75, pantaloni corti 98, maglione con collo tondo senza maniche 146, calzini al ginocchio 267, scarpe 260	924	1.17	0.71	0.11
109	Mutande 1, camicia a maniche corte 77, pantaloni aderenti 102, maglione con collo a V 135, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	868	1.17	0.72	0.112
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Pantaloni, giacca, panciotto					
110	Mutande 8, camicia 75, pantaloni aderenti 102, giacca 156, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	1130	1.23	0.96	0.149
116	Mutande 8, camicia 75, pantaloni larghi 103, panciotto 162, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	1039	1.29	0.86	0.133
117	Mutande 8, maglietta 30, camicia 75, pantaloni larghi 103, panciotto 162, giacca 157, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	1796	1.33	1.16	0.18
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Gonna, camicia					
130	Mutande 1, calze 3, camicia a maniche corte 77, gonna 304, sandali 272	451	1.26	0.54	0.084
131	Mutande 1, calze 3, camicia con maniche a 3/4 66, gonna 308, sandali 272	573	1.29	0.67	0.104
145	Mutande 1, calze 3, camicetta a maniche lunghe 67, gonna 306, sandali 272	373	1.27	0.52	0.081
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Gonna, maglione					
133	Mutande 1, calze 3, maglione con collo a V senza maniche 141, gonna 307, maglione con collo a V a maniche lunghe 139, sandali 272	670	1.29	0.64	0.099
137	Mutande 1, gonna 305, maglione a collo tondo 142, calze al ginocchio (spesse) 267	1020	1.29	0.92	0.143
141	Mutande 1, camicetta 24, gonna 309, maglione senza maniche con collo tondo 146, calze al ginocchio (spesse) 267, scarpe 260	961	1.3	0.81	0.126
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Gonna, giacca					
149	Mutande 1, sottoveste intera 5, calze 3, vestito senza maniche 336, sandali 272	325	1.15	0.46	0.071
148	Mutande 1, calze 3, sottoveste completa 5, vestito senza maniche con cintura 333, maglia con collo a V 136, scarpe 260	660	1.21	0.71	0.11
151	Mutande 1, calze 3, sottoveste completa 5, vestito 331, maglia con collo tondo 143, scarpe 260	852	1.25	0.93	0.144

Tabella 4

Recentemente, accanto al metodo tabellare, sono state proposte in letteratura relazioni per il calcolo della resistenza termica basate sullo spessore del tessuto e sulla superficie corporea effettivamente coperta. Tra tali relazioni la norma ISO 9920 riporta le seguenti:

$$I_{clu} = 0.00067 \cdot A_{cov} + 0.217 \cdot H_{fab} \cdot A_{cov} \quad (29)$$

$$I_{clu} = 0.0095 \cdot A_{cov} \quad (30)$$

dove H_{fb} è lo spessore del tessuto in fabbrica, [m]; A_{cov} rappresenta l'area della superficie del corpo coperta, espressa come una percentuale

L'area non coperta può essere ricavata facilmente dalla figura 1 moltiplicando il valore totale dell'area del corpo per la percentuale effettivamente coperta dall'indumento.

Il metodo più utilizzato per misurare direttamente l'isolamento termico dell'intero vestiario o di un singolo indumento è il manichino termico. Quest'ultimo è dotato sia della sensoristica necessaria alla misura, sia delle resistenze termiche idonee a simulare l'energia metabolica prodotta dall'organismo. La potenza delle resistenze termiche viene opportunamente controllata per ottenere una temperatura media della pelle prossima a quella umana in condizioni ambientali termicamente neutre. La prova viene generalmente effettuata in una cella climatica allo scopo di controllare i parametri ambientali in particolare viene mantenuta una velocità dell'aria al di sotto di 0.15 m/s, una differenza tra la temperatura dell'aria e quella media radiante al di sotto di 5°C, un'umidità relativa compresa tra 10-70%, un carico termico compreso tra 40-80W/m² ed infine una temperatura superficiale del manichino compresa tra 32 e 34°C.

La temperatura superficiale del manichino \bar{t}_{sk} , temperatura operativa \bar{t}_o e potenza termica prodotta dal manichino H vengono quindi accuratamente misurate per calcolare l'isolamento termico totale del vestiario I_T . Per determinare dunque l'isolamento termico intrinseco del vestiario I_{cl} è necessario sottrarre a questo l'isolamento termico esterno I_a ottenuto utilizzando il manichino nudo per una temperatura $\bar{t}_{sk} = \bar{t}_{cl}$.

Resistenza termica di alcune combinazioni tipiche di capi di abbigliamento (Tabella A 1 - ISO 9920)		
<i>Abbigliamento da lavoro</i>	[clo]	[m ² K/W]
Mutande, tuta, calzini, scarpe	0,70	0,110
Mutande, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0,75	0,115
Mutande, camicia, tuta, calzini, scarpe	0,80	0,125
Mutande, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	0,85	0,135
Mutande, camicia, pantaloni, grembiule, calzini, scarpe	0,90	0,140
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,00	0,155
Biancheria intima a gambe e maniche corte, camicia, pantaloni, tuta, calzini, scarpe	1,10	0,170
Biancheria intima a gambe e maniche lunghe, giacca termica, calzini, scarpe	1,20	0,185
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca termica, calzini, scarpe	1,25	0,190
Biancheria intima a maniche e gambe corte, tuta, giacca termica e pantaloni, calzini, scarpe	1,40	0,220
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca termica e pantaloni, calzini, scarpe	1,55	0,225
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe	1,85	0,285
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca conimbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe, berretto, guanti	2,00	0,310
Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, giacca termica e pantaloni, giacca termica per esterno e pantaloni, calzini, scarpe	2,20	0,340
Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, giacca termica e pantaloni, parka con imbottitura pesante, tuta con imbottitura pesante, calzini, scarpe, berretto, guanti	2,55	0,395
<i>Abbigliamento giornaliero</i>		
Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri, sandali	0,30	0,050
Slip, sottoveste, calze, abito leggero con maniche, sandali	0,45	0,070
Mutande, camicia con maniche corte, pantaloni leggeri, calzini leggeri, scarpe	0,50	0,080
Slip, calze, camicia a maniche corte, gonna, sandali	0,55	0,085
Mutande, camicia, pantaloni leggeri, calzini, scarpe	0,60	0,095
Slip, sottoveste, calze, abito, scarpe	0,70	0,105
Biancheria intima, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0,70	0,110
Biancheria intima, completo da corsa (maglia e pantaloni), calzini lunghi, scarpe da corsa	0,75	0,115
Slip, sottoveste, camicia, gonna, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe	0,80	0,120
Slip, camicia, gonna, maglione a girocollo, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe	0,90	0,140
Mutande, camicia a maniche corte, camicia, pantaloni, maglione con scollo a V, calzini, scarpe	0,95	0,145
Slip, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,00	0,155
Slip, calze, camicia, gonna, gilet, giacca	1,00	0,155
Slip, calze, blusa, gonna lunga, giacca, scarpe	1,10	0,170
Biancheria intima, camicia con maniche corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,10	0,170
Biancheria intima, camicia a maniche corte, camicia, pantaloni, gilet, giacca, calzini, scarpe	1,15	0,180
Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, camicia, pantaloni, maglione con scollo a V, giacca, calzini, scarpe	1,30	0,200
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, gilet, giacca, cappotto, calzini, scarpe	1,50	0,230

Tabella 5

Abbigliamento completo (tabella A2 ISO 9920)					
N°	Abbigliamento completo	Massa [g]	f _{cl}	I _{cl}	
				[clo]	[m ² C/W]
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Pantaloni, camicia					
100	Mutande 8, maglietta 30, pantaloncini 364, calzini al polpaccio 264, scarpe da ginnastica 262	318	1.1	0.33	0.051
101	Mutande 1, Cappello a cilindro 69, pantaloni corti 99, sandali 272	258	1.07	0.23	0.036
102	Mutande 8, maglia a maniche corte 79, pantaloni corti 97, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	622	1.11	0.41	0.064
103	Mutande 8, maglia con maniche a 3/4 66, pantaloni corti 97, calzini 263, scarpe da ginnastica 260	451	1.17	0.52	0.081
106	Mutande 1, camicia a maniche corte 68, pantaloni aderenti 102, sandali 272	523	1.14	0.44	0.068
....
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Pantaloni, maglione					
104	Mutande 8, camicia a maniche corte 77, pantaloni corti 97, maglione con collo a V 136, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	765	1.13	0.63	0.098
105	Mutande 1, camicia 75, pantaloni corti 98, maglione con collo tondo senza maniche 146, calzini al ginocchio 267, scarpe 260	924	1.17	0.71	0.11
109	Mutande 1, camicia a maniche corte 77, pantaloni aderenti 102, maglione con collo a V 135, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	868	1.17	0.72	0.112
....
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Pantaloni, giacca, panciotto					
110	Mutande 8, camicia 75, pantaloni aderenti 102, giacca 156, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	1130	1.23	0.96	0.149
116	Mutande 8, camicia 75, pantaloni larghi 103, panciotto 162, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	1039	1.29	0.86	0.133
117	Mutande 8, maglietta 30, camicia 75, pantaloni larghi 103, panciotto 162, giacca 157, calzini al polpaccio 265, scarpe 260	1796	1.33	1.16	0.18
....
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Gonna, camicia					
130	Mutande 1, calze 3, camicia a maniche corte 77, gonna 304, sandali 272	451	1.26	0.54	0.084
131	Mutande 1, calze 3, camicia con maniche a 3/4 66, gonna 308, sandali 272	573	1.29	0.67	0.104
145	Mutande 1, calze 3, camicetta a maniche lunghe 67, gonna 306, sandali 272	373	1.27	0.52	0.081
....	-
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Gonna, maglione					
133	Mutande 1, calze 3, maglione con collo a V senza maniche 141, gonna 307, maglione con collo a V a maniche lunghe 139, sandali 272	670	1.29	0.64	0.099
137	Mutande 1, gonna 305, maglione a collo tondo 142, calze al ginocchio (spesse) 267	1020	1.29	0.92	0.143
141	Mutande 1, camicetta 24, gonna 309, maglione senza maniche con collo tondo 146, calze al ginocchio (spesse) 267, scarpe 260	961	1.3	0.81	0.126
....
ABBIGLIAMENTO GIORNALIERO Gonna, giacca					
149	Mutande 1, sottoveste intera 5, calze 3, vestito senza maniche 336, sandali 272	325	1.15	0.46	0.071
148	Mutande 1, calze 3, sottoveste completa 5, vestito senza maniche con cintura 333, maglia con collo a V 136, scarpe 260	660	1.21	0.71	0.11
151	Mutande 1, calze 3, sottoveste completa 5, vestito 331, maglia con collo tondo 143, scarpe 260	852	1.25	0.93	0.144
....

Tabella 6

TABELLA B1 Resistenza termica di alcune combinazioni tipiche di capi di abbigliamento (Tabella B1 - ISO 9920)		
	[clo]	[m ² K/W]
Maglieria intima		
Slip	0,03	0,005
Mutande lunghe	0,10	0,016
Camiciola	0,04	0,006
Maglia a maniche corte	0,09	0,014
Maglia a maniche lunghe	0,12	0,019
Slip e reggiseno	0,03	0,005
Maglie - bluse		
Maniche corte	0,15	0,023
Leggera, a maniche lunghe	0,20	0,031
Normale, a maniche lunghe	0,25	0,039
Di flanella, a maniche lunghe	0,30	0,047
Blusa leggera, a maniche lunghe	0,15	0,023
Pantaloni		
Corti	0,06	0,009
Leggeri	0,20	0,031
Normali	0,25	0,039
Di flanella	0,28	0,043
Abiti -gonne		
Gonna leggera (estiva)	0,15	0,023
Gonna pesante (invernale)	0,25	0,039
Abito leggero, a maniche corte	0,20	0,031
Abito invernale, a maniche lunghe	0,40	0,062
Tuta	0,55	0,085
Maglioni		
Gilet	0,12	0,019
Maglione leggero	0,20	0,031
Calzini pesanti lunghi	0,10	0,016
Calze di nylon	0,03	0,005
Scarpe (suola sottile)	0,02	0,003
Scarpe (suola spessa)	0,04	0,006
Resistenza totale equivalente del vestiario		

Tabella 7

TABELLA B2 Descrizione indumento (tabella B2 ISO 9920)						
N°	Descrizione indumento	Genere N°	Tessuto N°	Massa ind. [g]	Icl	
					[clo]	[m ² C/W]
BIANCHERIA INTIMA						
1	Mutande	1	25	27	0,03	0,005
2	Calze	8	-	39	0,02	0,003
44	Reggiseno e mutande	7	57	87	0,04	0,006
MAGLIERIA INTIMA						
30	Maglietta	2	27	105	0,08	0,012
31	Maglietta	2	50	180	0,1	0,016
CAMICERIA INTIMA						
50	Maniche lunghe	2	35	-	0,33	0,051
51	Maniche lunghe	2	36	-	0,31	0,048
56	Maniche corte	3	91	284	0,24	0,037
66	Maniche a ¾	5	1	142	0,27	0,042
PANTALONI						
83	Pantaloncini corti	4	93	342	0,08	0,012
90	Pantaloni da lavoro	6	11	832	0,24	0,037
93	Tuta	7	60	755	0,24	0,036
TUTE						
110	Da lavoro	3	35	-	0,5	0,078
111	Da lavoro	3	42	-	0,52	0,081
121	Per protezione chimica	3	-	1340	0,6	0,093
MAGLIONI						
135	Maniche lunghe, collo a V	1	6	215	0,25	0,039
137	Maniche corte, collo a V	3	6	188	0,2	0,031
142	Maniche lunghe, collo tondo	6	7	424	0,36	0,056
GIACCHE						
150	Giacca senza bottoni	6	60	640	0,26	0,04
151	Giacca da lavoro	8	59	652	0,26	0,04
167	Giacca da lavoro da donna	3	58	400	0,24	0,037
CALZINI, SCARPE						
252	Calzini al polpaccio spessi	2	70	113	0,11	0,017
253	Calzini alle caviglie spessi	1	70	77	0,05	0,008
255	Scarpe di pelle, suola in gomma	6	-	-	0,02	0,003
GONNE						
300	Lunga fino alle caviglie	1	9	284	0,23	0,036
302	Lunga fino a 0,15m sotto il ginocchio	1	9	288	0,18	0,028
303	Lunga fino a 0,15m sopra il ginocchio	3	9	179	0,1	0,016

Tabella 8

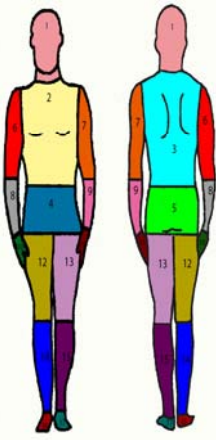
	Parti del corpo		% sul totale
	1	Testa – collo	8,7
	2	Torace	10,2
	3	Schiena	9,2
	4	Addome	6,1
	5	Natiche	6,6
	6	Arto superiore destro	4,7
	7	Arto superiore sinistro	5,2
	8	Arto inferiore destro	3,2
	9	Arto inferiore sinistro	3
	10	Mano destra	2,5
	11	Mano sinistra	2,5
	12	Coscia destra	9,1
	13	Coscia sinistra	9,3
	14	Polpaccio destro	6,1
	15	Polpaccio sinistro	6,2
	16	Piede destro	3,6
	17	Piede sinistro	3,8
Totale		100	

Figura 8 – Percentuale superficie area coperta



Figura 9 – Misura resistenza termica manichino

3.2 La stima del metabolismo energetico

L'energia chimica potenziale degli alimenti ingeriti dall'uomo viene come noto trasformata, mediante reazioni chimiche di ossidazione (prevalentemente esoenergetiche), in energia termica M e meccanica W. Questo processo costituisce il "metabolismo energetico" o "tasso metabolico" dell'individuo in cui una parte della produzione di energia termica è necessaria al corpo umano per mantenere costante la temperatura corporea e le funzioni vitali (il cosiddetto *metabolismo basale* circa pari a 43 W/m²), mentre la restante parte è quella necessaria per le diverse attività svolte dall'individuo di cui solo una piccola parte viene convertita in energia meccanica (notevolmente variabile a seconda del tipo di attività svolta).

Il metabolismo energetico viene espresso nel SI in watt (o anche riferendosi alla superficie unitaria del corpo in [W/m²]) anche se viene spesso utilizzata l'unità di misura incoerente met pari a 58.2 W/m².

I metodi più precisi per la misura del metabolismo energetico sono quelli calorimetrici diretti e indiretti. Generalmente però nelle valutazioni ergonomiche ed ambientali è sufficiente disporre di valori approssimati facendo ricorso a tabelle che consentano di determinare il tasso metabolico genericamente in base al tipo di occupazione (impiegato, portiere, carpentiere, ...) oppure alla specifica attività svolta (lavoro leggero, sostenuto, intenso, ...).

La norma UNI EN ISO 8996:2005 illustra tali metodi differenziandone il livello (esame, osservazione, analisi e perizia) in funzione della precisione ottenibile (Tabella 9).

Livello	Metodo	Incertezza	Ispezione dei luoghi di lavoro
1 Esame	1A: Classificazione in accordo all'occupazione	Rischio di errore molto grande	Non necessaria
	1B: Classificazione in accordo all'attività		
2 Osservazione	2A: Tabelle valori aggregati	Rischio di errore alto (incertezza ±20%)	Tempo e moto necessario allo studio
	2B: Tabelle aliquote disaggregate		
3 Analisi	Misura della frequenza cardiaca sotto assegnate condizioni	Rischio di errore medio (incertezza ±10%)	Studio richiesto per determinare un periodo rappresentativo
4 Analisi approfondita (Perizia)	4A: Misure del consumo di ossigeno	Incertezza funzione delle misure (incertezza ±5%)	Tempo e moto necessario allo studio
	4B: Metodo DLW		Ispezione del luogo di lavoro non necessaria, ma le attività disponibili devono essere valutate
	4C: Metodo calorimetrico diretto		Ispezione del luogo di lavoro non necessaria

Tabella 9 - Livelli per la determinazione del tasso metabolico.

Le tabelle riportate nella norma ISO 8996 sono state quindi suddivise in due categorie: quelle che consentono valutazioni di massima (livello 1) e quelle per valutazioni più dettagliate (livello 2). Nella prima categoria di tabelle viene riportato un intervallo di valori a cui fare riferimento per varie occupazioni (Tabella 10) ed attività (Tabella 11). Nella seconda categoria di tabelle vengono invece riportate i valori del tasso metabolico riferiti ad attività dettagliatamente specificate (Tabella 12) e le aliquote che consentono di determinare il metabolismo energetico come somma del metabolismo basale, dell'aliquota dovuta alla postura o alla velocità di movimento e dell'aliquota dovuta all'attività svolta (Tabella 13).

I metodi di analisi basate su misure calorimetriche indirette o dirette possono essere invece ricondotte a:

- il metodo indiretto basato sulla misura della frequenza cardiaca; in tal caso l'energia metabolica è determinata indirettamente dalla frequenza cardiaca registrata in un periodo di tempo rappresentativo sulla base della relazione esistente tra ossigeno inspirato e frequenza cardiaca stessa in assegnate condizioni. Secondo la norma UNI EN ISO 8996 e UNI EN ISO 9886 la frequenza cardiaca (generalmente misurata in bpm) può essere considerata come somma di diversi componenti:

$$HR = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_T + \Delta HR_N + \Delta HR_E \quad (31)$$

avendo indicato con HR_0 la frequenza cardiaca fermo in posizione prono in condizioni di neutralità termica; ΔHR_M l'incremento di frequenza dovuto al carico muscolare dinamico, in condizioni di neutralità termica; ΔHR_S l'incremento di frequenza cardiaca dovuto al lavoro statico muscolare; ΔHR_T l'incremento di frequenza cardiaca dovuto allo stress termico; ΔHR_N l'incremento di frequenza cardiaca dovuta all'impegno mentale; ΔHR_E l'incremento di frequenza cardiaca dovuto a altri fattori (i.e respirazione, ritmo circadiano, disidratazione).

Il metodo descritto presenta una buona approssimazione nel caso in cui il carico muscolare statico, lo stress termico ed il carico mentale siano trascurabili. In tal caso l'energia metabolica può essere calcolata dalla misura della frequenza cardiaca durante il lavoro mediante una relazione lineare tra l'energia metabolica e la frequenza cardiaca. La frequenza cardiaca può essere registrata in modo continuo (e.g. elettrocardiografo) oppure mediante il conteggio delle pulsazioni dell'arteria (e.g. cardiografometro) Figura 12a.

Per un intervallo dal limite inferiore di 120 bpm (ove la componente mentale può essere trascurata) a 20 battiti sotto la massima frequenza cardiaca del soggetto, la relazione fra frequenza cardiaca ed energia metabolica può essere scritta come:

$$HR = HR_0 + RM \cdot (M - M_0) \quad (32)$$

dove M è l'energia metabolica in $[W/m^2]$; M_0 è l'energia metabolica in pausa, in $[W/m^2]$; RM è l'incremento di frequenza cardiaca per unità di energia metabolica; HR_0 è la frequenza cardiaca a riposo, in condizioni di neutralità termica.

- il metodo basato sulla misura della quantità di ossigeno consumato; in tal caso l'energia metabolica può essere calcolata sempre indirettamente seguendo due diverse metodologie:

i) metodo parziale, utilizzato nel caso di lavoro leggero o moderatamente pesante, in cui l'ossigeno inspirato raggiunge un valore stazionario uguale alla richiesta di ossigeno dopo un breve periodo di lavoro; la raccolta di aria espirata inizia dopo circa 5 min (in modo da superare il periodo preliminare di transitorio) e continua nel periodo principale (senza interrompere il lavoro) per 5- 10 min. La misura dell'aria espirata può essere effettuata sia raccogliendo tutta l'aria espirata mediante una borsa Douglas, sia per campionamento con un misuratore di portata (Figura 12b);

L'energia metabolica viene quindi determinata tramite la misura del consumo dell'ossigeno V_{O_2} [dm^3/h], che attraverso l'equivalente energetico, EE [$W \cdot h / dm^3$] dell'ossigeno e l'area del corpo A_{Du} [m^3] viene convertito in energia metabolica:

$$M = EE \cdot V_{O_2} / A_{Du} \quad (33)$$

L'equivalente energetico dipende dal tipo di metabolismo ed è funzione del quoziente respiratorio (RQ) pari al rapporto tra le portate di anidride carbonica V_{CO_2} e di ossigeno V_{O_2} secondo la relazione:

$$EE = (0.23 \cdot RQ + 0.77) \cdot 5.88 \quad (34)$$

Nella determinazione del tasso metabolico, l'uso di un RQ di 0,85 e di un EE di 5,68 $W \cdot h/l$ è, generalmente, sufficiente con un errore mediamente inferiore all'1%.

ii) metodo integrale, utilizzato nel caso di lavoro pesante di breve durata, la richiesta di ossigeno è superiore al limite della potenza aerobica di lunga durata (e.g. consumo di ossigeno maggiore di 60 litri/ora) ed il deficit di ossigeno viene bilanciato dopo che il lavoro è terminato. In tal caso l'intervallo di misura deve includere sia periodo di lavoro che il seguente periodo di riposo (Figura 11);

Il calcolo sarà effettuato come differenza tra il tasso metabolico totale misurato e il tasso metabolico conosciuto durante il periodo di riposo, seduto. Il tasso metabolico è ricavato dal metodo parziale tramite la seguente conversione:

$$M = \left(\frac{M_p (t_m + t_r)}{t_m} \right) - \left(M_p \cdot \frac{t_r}{t_m} \right) \quad (35)$$

- il metodo basato sulla la misura DLW (doubly labelled water); questo si basa sulla misura di un campione della prima urina dopo che il soggetto ha bevuto una precisa quantità di $2H_2^{18}O$. Il deuterio $2H$ rappresenta la quantità di acqua ed il relativo tasso della scomparsa dal corpo (k_2) fornisce una misura dello scambio di acqua.

^{18}O identifica sia la quantità di bicarbonato che dell'acqua che sono in rapido equilibrio con la reazione dell'anidride carbonica.

La frazione di ^{18}O (k_{18}) scomparso indica una misura del contemporaneo scambio di acqua e del bicarbonato ($r_{H_2O+r_{CO_2}}$). Quindi, lo scambio del bicarbonato (p. es. i soggetti che producono una frazione di diossido di carbonio) può essere calcolato come la differenza fra le due frazioni costanti ($k_{18}-k_2$).

La quantità di diossido di carbonio può essere convertito in energia spesa usando il classico metodo di calcolo calorimetrico. La diluizione iniziale degli isotopi produce una misura del $2H$ e ^{18}O usualmente nei calcoli della composizione del corpo.

Il metodo richiede che le misure siano fatte su almeno due semi vite biologiche degli isotopi: nei bambini, il minimo test di durata è sei giorni, in un adulto normale è circa 12 – 14 giorni, ed in un anziano può essere più lungo.

Il metodo DLW può essere confrontato con il calorimetro di tutto il corpo e prese le procedure di confronto in un numero di studi. Nessuno di questi ha registrato una significativa discrepanza fra DLW e il metodo comparatore in soggetti sotto condizioni di stato consolidato. In generale la precisione del metodo è circa $\pm 5\%$ dipendendo dalle circostanze.

Benché la tecnica DLW è concettualmente semplice, vi sono un numero di dettagli complessi che devono essere compresi dall'utilizzatore.

- la misura calorimetria diretta dell'energia metabolica

Valutazione dell'energia Metabolica (livello 1A)		
Energia Metabolica per varie occupazioni (ISO 8996 - tabella A1)		
Occupazione		Energia Metabolica [W/m ²]
Lavoro di ufficio	Lavoro sedentario	55 - 70
	lavoro da impiegato	70 - 100
Artigiano	portiere	80 - 115
	Muratore	110 - 160
	Carpentiere	110 - 175
	Vetraio	90 - 125
	Imbianchino	100 - 130
	Fornaio	110 - 140
	Macellaio	105 - 140
	Orologiaio	50 - 70
Industria mineraria	Autista	70 - 85
	Minatore	110
	Lavoratore di forno da coke	115 - 175
Industria del ferro e dell'acciaio	Lavoratore di altoforno	170 - 220
	Lavoratore al forno elettrico	125 - 145
	Formatore	140 - 240
	Macchina di formatura	105 - 165
	Uomo di fonderia	140 - 240
Industria della lavorazione metallica e del ferro	Fabbro	90 - 200
	Saldatore	75 - 125
	Tornitore	75 - 125
	Operatore alla perforazione	80 - 140
	Meccanica di precisione	70 - 110
Lavorazioni grafiche	Compositore manuale	70 - 95
	Rilegatore	75 - 100
Agricoltura	Giardiniere	115 - 190
	Trattorista	85 - 110
Circolazione	Autista	70 - 100
	Autista autobus	75 - 125
	Autista di tram	80 - 115
	Operatore all'auto gru	65 - 145
Occupazione varie	Assistente di laboratorio	85 - 100
	Professore	85 - 100
	Commesso	100 - 120
	Segretario	70 - 85

Tabella 10

Valutazione dell'energia Metabolica (livello IB)			
Classificazione dei livelli secondo (ISO 8996 - tabella A2)			
Classe	Valore medi energia metabolica		Esempi
	W/m ²	W	
Classe 0: A riposo	65 (55 a 70)	115 (100 a 125)	Riposo
Classe 1: Tasso metabolico basso	100 (70 a 130)	180 (125 a 235)	Seduto a proprio agio: lavoro manuale leggero (scrittura, battitura a macchina, disegno, taglio, contabilità); lavoro con mani e braccia (piccoli utensili, ispezione, montaggio o cernita di materiale leggero); lavoro con braccia e gambe (guida di un veicolo in condizioni normali, manovra di un pedale o di interruttore con i piedi). In piedi: lavoro con trapano (piccoli pezzi); fresatrice (piccoli pezzi); avvolgimento bobine; avvolgimento piccole armature; lavoro con macchine di piccola potenza; passeggiare (velocità fino a 3.5 km/h).
Classe 2: Tasso metabolico moderato	165 (130 a 200)	295 (235 a 360)	Lavoro sostenuto con mani e braccia: (martellare chiodi, limare); lavoro con braccia e gambe (guida di autocarri fuori strada, trattori o macchine per costruzione); lavoro con braccia e tronco (lavoro con martello pneumatico, montaggio trattori, intonacare, movimentazione intermittente di materiale moderatamente pesante, sarchiare, zappare, raccogliere frutta o verdura); spingere o tirare carri leggeri o carriole; camminare a velocità compresa tra 3,5 e 5,5 km/h; fucinare.
Classe 3: Tasso metabolico elevato	230 (200 a 260)	415 (360 a 465)	Lavoro intenso con braccia e tronco; portare materiale pesante; scavare con pala; lavorare con martello; segare, piallare o scalpellare legno duro; tosare l'erba a mano; scavare; camminare ad una velocità tra 5,5 e 7 km/h. Spingere o tirare carri e carriole con carichi pesanti; sbavare pezzi fusi; disporre blocchi di cemento.
Classe 4: Tasso metabolico molto elevato	290 (>260)	520 (>465)	Attività molto intensa a ritmo da veloce a massimo; lavorare con la scure; scavare in modo intenso; salire scale o rampe; camminare velocemente a piccoli passi, correre, camminare a velocità superiore a 7 km/h.

Tabella 11

Energia metabolica in W/m ² per un soggetto seduto in funzione del carico di lavoro e delle parti del corpo coinvolte (ISO 8996 - tabella B1)				
Parti del corpo		Carico di lavoro		
		leggero	medio	pesante
Entrambe le mani	Valore medio	70	85	95
	Intervallo	<75	75 - 90	>90
Un braccio	Valore medio	90	110	130
	Intervallo	<100	100 - 120	>120
Entrambe le braccia	Valore medio	120	140	160
	Intervallo	<130	130 - 150	>150
Corpo	Valore medio	180	245	335
	Intervallo	<210	210 - 285	>285

Tabella 12

Supplemento di energia metabolica in W/m ² per posizioni del corpo	
Posizione del corpo	Energia metabolica in W/m ²
Seduto	0
Inginocchiato	10
Accovacciato	10
In piedi	15
In piedi inclinato	20

Tabella 13

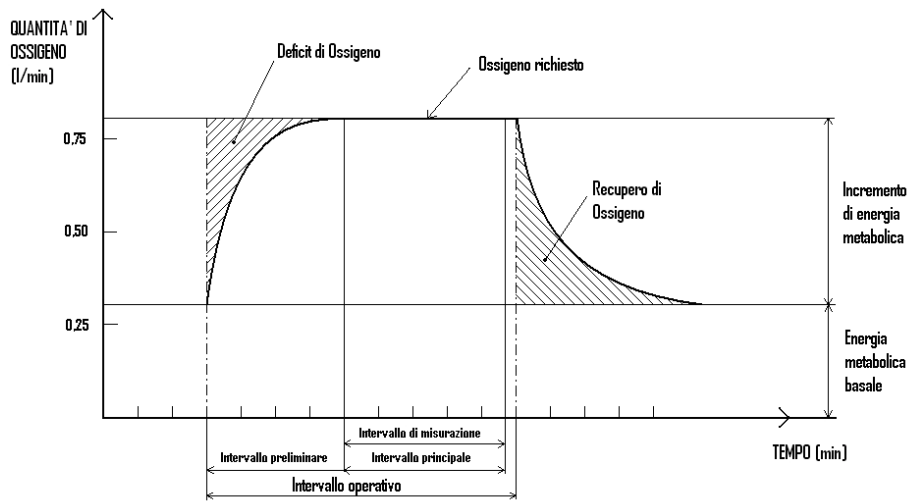


Figura 10

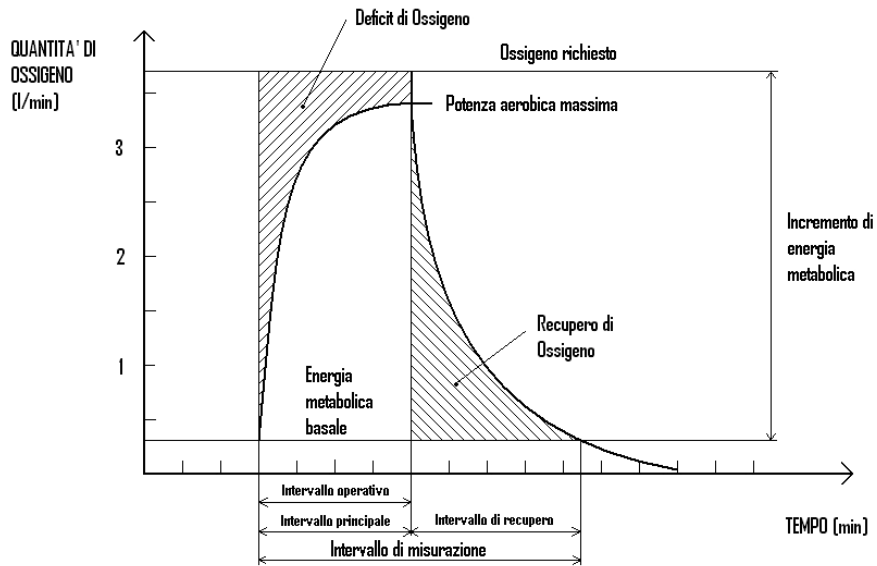


Figura 11



Figura 12 – Strumenti di misura calorimetrici: a) cardiofrenzometro; b) pirometro.

4. La misura del benessere e dello stress termico

Per comprendere l'incertezza nella stima degli indici di comfort termoigrometrico (i.e. PMV) e di stress termico in ambienti caldi (i.e. WBGT) e freddi (i.e. IREQ) è possibile valutare la variazione di questi alla variare delle rispettive variabili di misura indipendenti.

Nel caso della stima del PMV tale valutazione può essere semplicemente effettuata con un metodo alle differenze mediante la variazione degli indici rispetto ai sei parametri indipendenti T_a , T_r , w , UR , I_{cl} e M . In particolare è possibile stimare il discostamento massimo che l'indice può subire in funzione degli errori massimi ammessi dalle norme UNI-EN ISO 7726 nella misura dei parametri fisici e dalle norme UNI-EN ISO 8996 ed UNI EN-ISO 9920 nella misura dei parametri individuali. (Tabella 14)

Dall'esame della tabella è possibile evidenziare che:

- sebbene le sensibilità del PMV agli errori di misura sulla temperatura dell'aria e sulla temperatura media radiante siano paragonabili, è evidente che la maggiore incertezza nella misura della temperatura media radiante renda maggiormente critica quest'ultima rispetto a quella della temperatura dell'aria;
- la sensibilità del PMV all'errore di misura sulla umidità relativa è sicuramente poco rilevante in condizioni di benessere;
- la sensibilità del PMV all'errore di misura sulla velocità dell'aria è sicuramente poco rilevante in condizioni di benessere;
- l'errore sul PMV determinato dalla misura dei parametri individuali M ed I_{cl} può essere rilevante quando queste vengano stimate in modo approssimativo (ovvero con errori maggiori del 10%)

Anche nel caso della stima del WBGT, la valutazione dell'incertezza di misura può essere semplicemente effettuata con il metodo delle differenze rispetto ai tre parametri indipendenti T_g , T_n , w , T_a e tenendo conto che il WBGT limite varia in funzione di M (Tabella 15) analogamente al PMV.

Dall'esame della tabella è possibile evidenziare che la sensibilità del WBGT all'errore di misura sulle temperature è maggiore per la temperatura di bulbo umido a ventilazione naturale rispetto a quelle media radiante e dell'aria.

Infine nella stima dell'incertezza di misura dell'IREQ rispetto ai cinque parametri indipendenti t_a , t_{mr} , UR , V_a ed M , dall'esame della Tabella 16, è possibile evidenziare l'elevata sensibilità dell'IREQ all'errore di misura del metabolismo.

	t_a (°C)	t_{mr} (°C)	UR%	w_a (m/s)	M (met)	I_{cl} (clo)	PMV	Errore PMV
	23	23	60	0.10	1	1	0	
Errore $t_a=0.5^\circ\text{C}$	23.5	23	60	0.10	1	1	0.07	0.07
Errore $t_{mr}=2^\circ\text{C}$	23	25	60	0.10	1	1	0.25	0.25
Errore UR=5%*	23	23	65	0.10	1	1	0,03	0,03
Errore $w_a=0.15$	23	23	60	0.15	1	1	-0.12	-0.12
Errore $M=10\%$	23	23	60	0.10	1,1	1	0,20	0,20
Errore $I_{cl}=10\%$	23	23	60	0.10	1	1,1	0,14	0,14

* equivalenti ad un errore di circa 150kPa nelle condizioni ambientali utilizzate

Tabella 14- Influenza delle incertezze nella misura del PMV e PPD (classe C benessere)

	t_a (°C)	t_g (°C)	t_{nw} (°C)	M (met)	WBGT	Errore WBGT
	30	35	25	4	27.5	
Errore $t_a=0.5^\circ\text{C}$	30.5	35	25	4	27.6	0.05 (0 per ambienti interni)
Errore $t_g=0.5^\circ\text{C}$	30	35.5	25	4	27.6	0.1 (015 per per ambienti interni)
Errore $t_n=0.5^\circ\text{C}$	30	35	25.5	4	27.9	0.35
Errore $M=10\%$	30	35	25	4.4		(influisce sul WBGT limite)

Tabella 15 - Influenza delle incertezze nella misura del WBGT in ambienti severi caldi (classe S stress termico)

	t_a (°C)	t_{mr} (°C)	UR%	w_a (m/s)	M (met)	IREQ (clo)	Errore IREQ
	-10	-10	50	1	2	2.59	
Errore $t_a=0.5^\circ\text{C}$	-9.5	-10	50	1	2	2.56	0.03
Errore $t_{mr}=0.5^\circ\text{C}$	-10	-9.5	50	1	2	2.58	0.01
Errore UR=5%	-10	-10	50.5	1	2	2.58	0.01
Errore $w_a=0.15\text{m/s}$	-10	-10	50	1.1	2	2.60	0.01
Errore $M=10\%$	-10	-10	50	1	2.2	2.32	0.27

Tabella 16 - Influenza delle incertezze nella misura dell' IREQ in ambienti severi freddi (classe S stress termico)

Bibliografia

- Fanger (1970). Thermal comfort. McGraw-Hill, Danish Technical Press. Copenhagen.
- Alfano G., d'Ambrosio F.R., Riccio G. (1997). La valutazione delle condizioni termoisometriche negli ambienti di lavoro: comfort e sicurezza. Napoli: CUEN.
- Alfano G., d'Ambrosio F.R., Esposito L. Valutazione della sensibilità dell'indice PMV alla variazione delle sue variabili indipendenti. Atti del 55° Congresso Nazionale dell'ATI, 2000, Matera.
- Alfano G., d'Ambrosio F.R., Riccio G. Sensibility of the PMV index to variations of its independent variables. Proceedings of the Conference "Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century"; 2001, 158-165, Cumberland Lodge, Windsor, U.K.
- Hardy J.D., e Bard P. (1977). Regolazione della temperatura corporea. In: Trattato di fisiologia medica di Mountcastle, 2a edizione. Padova: Piccin Editore, 2(56): 1527-1570.
- UNI (1997). UNI EN ISO 7730. *Ambienti termici moderati – Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico*. Unificazioni Italiana, Milano.
- UNI (2004). UNI EN ISO 9886. *Ergonomia - Valutazione degli effetti termici mediante misurazioni fisiologiche*. Unificazioni Italiana, Milano.
- UNI (2002). UNI EN ISO 7726. *Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*. Unificazione Italiana, Milano.
- UNI (1996). UNI-EN-ISO 28996. *Ergonomia - Determinazione della produzione di energia termica metabolica*. Unificazione Italiana, Milano.
- UNI (2004). UNI-EN-ISO 9920. *Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento*. Unificazione Italiana, Milano.
- UNI (2004). UNI-EN-ISO 13731. *Ergonomia degli ambienti termici - Glossario e simboli*. Unificazione Italiana, Milano.
- UNI (2002). UNI-EN-ISO 10551. *Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dell'influenza dell'ambiente termico mediante scale di giudizio soggettivo*. Unificazione Italiana, Milano.
- UNI (1997). UNI EN ISO 7730. *Ambienti termici moderati - Determinazione degli indici PMV e PPD e specifiche per le condizioni di benessere termico*. Unificazione Italiana, Milano.
- ASHRAE (2005). Physiological principles, comfort and health. In: ASHRAE Fundamentals, ch. 8. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE (2003). Thermal environmental conditions for human occupancy. BSR/ASHRAE Standard 55P. Fourth Public Review. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- CEN. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort. prEN 7730. Bruxelles: Comité Européen de Normalisation. 2004.
- CEN. Ventilation for buildings: Design criteria for the indoor environment. R 1752. Bruxelles: Comité Européen de Normalisation, 1998.
- CEN. Ergonomics of the thermal environment - Risk assessment strategy for the prevention of stress or discomfort in thermal working conditions. Standard EN-ISO 15265. Bruxelles: Comité Européen de Normalisation. 2004.