

Francesco Chirico

PREFAZIONE DI
Gianstefano Zunino

IL COMFORT TERMICO NEGLI AMBIENTI DI LAVORO

Strumenti per la consulenza tecnica
e la sorveglianza sanitaria



Titolo

Il comfort termico negli ambienti di lavoro

Strumenti per la valutazione del rischio e la sorveglianza sanitaria

Autore

Francesco Chirico

ISBN 9788867631681

Edizioni FerrariSinibaldi è il marchio editoriale di

SIPISS - Società Italiana di Psicoterapia Integrata per lo Sviluppo Sociale

Direttore Editoriale: Giuseppe Ferrari

Direttore Scientifico della *Collana Psicologia e Medicina del Lavoro*:
Francesco Chirico

© 2016 Sipiss S.n.c.

Tutti i diritti riservati, è vietata qualsiasi riproduzione anche parziale, con qualsiasi mezzo effettuata, anche ad uso interno e didattico, non autorizzata.

2016 - Edizioni FerrariSinibaldi
Via Menotti, 9 - 20129 Milano
www.edizionifs.com

Prima edizione: novembre 2016

Finito di stampare nel mese di novembre 2016

da DigitalPrint S.r.l. - Segrate (Milano)

Il comfort termico negli ambienti di lavoro

Strumenti per la consulenza tecnica e la
sorveglianza sanitaria

Francesco Chirico

Prefazione di Gianstefano Zunino <i>CEO LSI LASTEM</i>	9
Introduzione	11
CAPITOLO 1	
Il benessere negli ambienti di lavoro “indoor”	17
CAPITOLO 2	
La teoria del bilancio termico	23
CAPITOLO 3	
Il benessere termico e i modelli di comfort termico.....	35
CAPITOLO 4	
La valutazione del rischio “Microclima moderato”	59
CAPITOLO 5	
La sorveglianza sanitaria	101

CAPITOLO 6

La qualità dell'aria indoor 107

CAPITOLO 7

Il modello "PMV/PPD" di Fanger 117

CAPITOLO 8

Il modello adattivo 145

CAPITOLO 9

L'indagine ambientale: la strumentazione tecnica..... 155

CAPITOLO 10

L'indagine ambientale: strategie e
tecniche di misurazione..... 169

CAPITOLO 11

I parametri individuali: il metabolismo 185

CAPITOLO 12

I parametri individuali: il vestiario indossato 195

CAPITOLO 13

Gli indicatori di benessere "diretti" 201

CAPITOLO 14

Gli indicatori di benessere derivati razionalmente..... 211

CAPITOLO 15

Gli indicatori termici e le norme tecniche 219

CAPITOLO 16

La misura delle grandezze fondamentali 233

CAPITOLO 17

La normativa negli ambienti termici di tipo moderato.....	241
--	-----

CAPITOLO 18

La normativa tecnica.....	255
---------------------------	-----

CAPITOLO 19

Cenni di termotecnica: gli impianti termici e di condizionamento.....	259
--	-----

CAPITOLO 20

L'informazione e la formazione sul microclima moderato.....	271
--	-----

Allegati

Scaricabili dal Portale Edizioni FS	275
---	-----

Bibliografia	283
--------------------	-----

Alla migliore famiglia che potessi avere:
mia moglie Gabriella, mio figlio Luca e mia
figlia Francesca!

A mia madre, instancabile esempio di coraggio
e di amore cristiano!

Prefazione

È bastata una prima lettura alle pagine di questo volume per convincermi che la LSI LASTEM non poteva lasciarsi scappare l'occasione di presentarlo, non tanto perché all'interno si fanno precisi riferimenti alla strumentazione dell'azienda, quanto per la precisione, l'accuratezza e la completezza che l'autore ha saputo mettere in questo manuale.

Questo libro, destinato a chi si avvicina o già lavora sui temi del monitoraggio ambientale nei luoghi di lavoro, guida il lettore con mano sicura e competente tra le normative, gli aspetti più scientifici senza tralasciare quelli pratici che solo l'esperienza insegna.

Fin dalla sua fondazione, avvenuta nel 1972, la nostra azienda ha continuamente patrocinato e contribuito realizzare iniziative destinate al supporto scientifico della propria clientela e questo volume rappresenterà certamente un importante apporto al suo patrimonio formativo.

Utilizzando le parole del nostro fondatore Luciano Certo "la convinzione della nostra azienda è che un fabbricante non possa limitarsi alla mera fornitura di strumentazione per l'analisi ambientale, ma debba anche contribuire a fornire ai propri utenti assistenza sul piano informativo, rendendo disponibili i supporti culturali per comprendere

il significato delle informazioni ottenute dagli strumenti di misura.”

Francesco Chirico è medico specialista in medicina del lavoro, che ha coniugato esperienza e professionalità alla capacità divulgativa, permettendo al lettore di acquisire nozioni, informazioni e contenuti tecnici complessi, in modo gradevole e agevole. Chirico è autore di numerosi articoli scientifici e pubblicazioni sulla medicina del lavoro frutto di ricerche ed esperienze sul campo, che lo rendono sicuramente uno dei più esperti in questo campo.

La lettura di questo volume ha permesso anche ai nostri tecnici, che da anni lavorano sugli strumenti di misura per il comfort negli ambienti di lavoro, di imparare qualcosa in più sull'argomento. La ricchezza dei contenuti e la profondità con cui sono trattati permettono al lettore di acquisire tutto ciò che è necessario per intraprendere uno studio accurato e approfondito.

Nel corso degli ultimi 10 anni abbiamo visto che l'attenzione è sempre costante per i microclimi severi, ma non si impone anche per le condizioni moderate. Segno che ancora non si è compreso appieno quanto incide l'ambiente anche nei luoghi di lavoro meno disagiati, dove il lavoro è più leggero. Anche in questi casi si è dimostrato che condizioni ambientali idonee favoriscono produttività, efficienza e benessere per chi lavora. Mi auguro che questo libro, che approfondisce bene il tema dei microclimi moderati, sia un utile tassello per sensibilizzare i professionisti su questo argomento.

Gianstefano Zunino
CEO LSI LASTEM

Introduzione

Che cos'è il comfort termico? Quando si realizzano le condizioni di benessere termico negli ambienti di lavoro indoor? Perché esso è così importante per i lavoratori? È obbligatorio per il datore di lavoro garantire il comfort termico negli ambienti di lavoro? Come può il datore di lavoro condurre la valutazione del rischio per il “microclima moderato” in modo efficace? Quando possono esservi dei problemi di salute per i lavoratori che occupano gli ambienti indoor? Che cos'è un ambiente indoor?

Questo libro è un manuale tecnico che cerca di dare una risposta a tutte queste domande. Per capire bene il concetto di “benessere termico” (e spiegare anche il titolo di questo libro) dobbiamo prima di tutto, però, comprendere il significato di “microclima”.

Il microclima può essere definito come il “complesso dei parametri climatici di un ambiente locale, non necessariamente confinato, che determina gli scambi termici fra quell'ambiente e gli individui che vi operano” (Ispesl, 2006). Da questa definizione si comprende, pertanto, come qualunque ambiente di lavoro, sia di tipo confinato sia all'aria aperta possiede un proprio microclima. Ciò ci permette anche di spiegare la differenza tra microclima “moderato” e microclima “severo”. Gli ambienti di lavoro

“outdoor” (ovvero all’aria aperta), possiedono generalmente un microclima di tipo “severo” in quanto i parametri ambientali, estremamente variabili e “vincolati” al clima esterno, possono portare nei lavoratori esposti particolari condizioni di stress termico: pensiamo, per esempio, al lavoro degli operai edili o al lavoro nei campi agricoli che espongono il lavoratore sia al caldo (in estate) sia al freddo ed alla pioggia (in inverno) senza che ciò possa essere evitato in alcun modo; le misure di prevenzione e protezione, in questi casi, serviranno solo a controllare, ovvero a contenere e ridurre, i possibili effetti negativi derivanti da tali, ineliminabili, situazioni di rischio. Tuttavia, all’opposto, gli ambienti di lavoro “indoor” (cioè confinati), NON possiedono sempre e comunque un microclima di tipo “moderato”. Gli ambienti di lavoro indoor, infatti, possono essere suddivisi in due differenti tipologie di ambienti di lavoro. In un primo gruppo possiamo comprendere il classico lavoro d’ufficio e gli altri ambienti di lavoro simili (per es. biblioteche, archivi ecc.): qui il microclima è di tipo “moderato”. Esiste, però, un altro gruppo di lavori svolti in ambienti confinati, dove, invece, il microclima è di tipo “severo” perché in essi, uno o più dei parametri ambientali e/o individuali è “vincolato” da particolari esigenze organizzative e/o produttive. Questo è il caso, per esempio, del lavoro svolto presso le cucine industriali, i forni, le serre o le celle frigorifere. Qui, le condizioni ambientali imposte, il tipo di vestiario indossato e/o il dispendio metabolico prodotto dall’impegno muscolare necessario per l’espletamento dell’attività lavorativa richiesta, possono facilmente gravare sul bilancio termico complessivo del singolo individuo al punto da determinare uno stato di stress termico, tale da portare anche a gravi conseguenze per la salute del lavoratore esposto (se non si interviene con le opportune misure di prevenzione e protezione che dovranno essere idonee ed efficaci). In questo manuale parleremo di ambienti di lavoro “indoor” di tipo “moderato”. Infatti mentre

negli ambienti di lavoro “severi” la valutazione del rischio e le misure di prevenzione e protezione sono mirate alla tutela della salute del lavoratore (qui il “comfort termico” rappresenta un obiettivo difficilmente perseguibile), negli ambienti di lavoro di tipo “moderato” il datore di lavoro dovrà sempre garantire condizioni di comfort e di benessere termico per tutti i lavoratori: in tali ambienti, infatti, i parametri ambientali dovranno sempre essere omogenei, controllabili e poco variabili nel tempo e dovranno consentire agli occupanti l’edificio di raggiungere facilmente uno stato di “benessere” o di “comfort” termico: non saranno accettabili, pertanto, in tali ambienti, condizioni termiche di tipo “severo”, nemmeno per brevi periodi di tempo.

Come sarà spiegato meglio nel primo capitolo di questo libro, il microclima “termico” è solo uno dei fattori che contribuiscono al benessere globale del lavoratore “occupante l’edificio”; esistono, infatti, altre componenti necessarie affinché il lavoratore impegnato negli ambienti indoor possa raggiungere il pieno benessere psico-fisico, come la componente visiva, quella acustica e quella olfattiva (o, più in generale, quella relativa alla qualità dell’aria indoor).

Tuttavia, in questi anni, durante l’esecuzione delle indagini ambientali di tipo microclimatico, ho potuto constatare che il microclima termico rappresenta una delle componenti del benessere che più facilmente viene chiamata in causa dai lavoratori come la causa principale (vera o presunta tale) di “disagio” negli ambienti di lavoro di tipo moderato. Una delle ragioni di ciò, probabilmente, deriva dall’importante diffusione del settore lavorativo “terziario” e dai tempi di permanenza dell’uomo estremamente elevati, oggi, tra casa e lavoro, negli ambienti indoor. Ciò ha spinto in anni recenti anche il legislatore europeo e nazionale a dare grande attenzione agli ambienti di lavoro indoor e ad alcuni rischi lavorativi come, per esempio, quello derivante dall’uso delle attrezzature munite di videoterminali. Un’altra ragione deriva dal ripensamento del concetto di “salute” negli

ambienti di lavoro. La celebre definizione data dall'OMS di "salute" intesa non più come "assenza di malattia o infermità" ma come "presenza di uno stato di benessere fisico, mentale e sociale", anche se criticata da alcuni ricercatori in quanto più vicina al concetto di "felicità" che a quello di "salute", è stata acquisita anche dal nostro legislatore in riferimento alla tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro (art. 2 D.Lgs. 81/08). Questo ripensamento del concetto di salute è stato peraltro rafforzato, dalla recente introduzione, con il D.Lgs. 81/08, del principio di "promozione della salute nei luoghi di lavoro" che il datore di lavoro (anche se in forma volontaria) dovrebbe mettere in atto, con la collaborazione del medico competente (art. 25 D.Lgs. 81/08), a favore dei lavoratori. Non ultimo e non meno importante il fatto che gli ambienti di lavoro indoor che dovrebbero essere "moderati", spesso non lo sono, a causa di una poco attenta progettazione e/o gestione degli impianti termici da parte dei loro responsabili.

In considerazione di tutto ciò e sulla base del principio di inclusione di tutti i fattori di rischio nel processo di valutazione del rischio, il "microclima", anche se già presente nella normativa degli anni cinquanta (ma forse poco evidenziato nel D.Lgs 626/04), è stato esplicitamente citato tra i fattori di rischio di tipo "fisico" dal Titolo VIII (art. 180) del D.Lgs. 81/08. Anche noi abbiamo deciso di occuparci, nell'ambito della collana di psicologia e di medicina del lavoro, di questo particolare e forse non troppo conosciuto fattore di rischio lavorativo. Il microclima di tipo "moderato", infatti, anche se viene considerato un fattore di rischio relativamente semplice da affrontare, perché la magnitudo o gravità dell'effetto per la salute e la sicurezza dei lavoratori è sicuramente molto più bassa rispetto ai tradizionali fattori di rischio della medicina del lavoro, nasconde, tuttavia, delle insidie sia per il datore di lavoro sia per le altre figure impegnate nella sicurezza aziendale. Infatti, la sua corretta individuazione e valutazione del rischio potrebbe-

ro risultare difficoltose già dalla prima lettura della norma di legge. Il D.Lgs. 81/08, infatti, non specifica, di “quale” tipo di microclima si tratti, se di quello “moderato”, di quello “severo” o se, più probabilmente, di entrambi. La norma di legge (D.Lgs. 81/08) cita semplicemente il “microclima” tra i fattori di rischio di tipo fisico da valutare, senza però dedicargli un titolo specifico, costringendo così il consulente tecnico ed il medico competente a rifarsi ad un insieme complesso ed eterogeneo di norme tecniche da omogeneizzare con l’allegato IV del D.Lgs. 81/08 e con le linee guida esistenti (ISPESL, 2006; Coordinamento Tecnico Interregionale, 2009); esiste, perciò, il rischio concreto di perdersi in un labirinto di normative tecniche, di cui alcune non ancora tradotte in lingua italiana, che richiedono una preparazione di tipo super-specialistico per poter essere comprese. Questo libro è stato scritto, pertanto, con l’intenzione di raccogliere tutte queste informazioni in un unico manuale per rendere più agevole il lavoro del consulente tecnico del datore di lavoro (responsabili del servizio di prevenzione e protezione, ingegneri ambientali, tecnici di prevenzione nei luoghi di lavoro, consulenti tecnici e medici competenti) oltre che per essere una guida utile ed aggiornata per i lavoratori e per gli studiosi del settore. Il libro contiene oltre alle informazioni tratte dalla letteratura scientifica di riferimento e dalle normative tecniche, alcuni strumenti utili per affrontare efficacemente il processo di valutazione del rischio, quali questionari, check lists e relazioni tecniche già “sperimentate” sul campo e comunque implementabili; contiene informazioni utili anche per la sorveglianza sanitaria dal momento che i medici competenti devono collaborare con il datore di lavoro nel processo di valutazione del rischio; senza dimenticare che l’ambiente termico, insieme agli altri determinanti di benessere indoor, è stato spesso chiamato in causa nella genesi di disturbi per la salute, di non semplice inquadramento diagnostico, che possono trovare la loro origine proprio negli ambienti

indoor, come, per esempio, le patologie correlate all'edificio o la sindrome dell'edificio malato.

Il libro si struttura nel seguente modo: i primi capitoli sintetizzano tutte le informazioni essenziali per una efficace valutazione del rischio: il benessere termico ed i modelli di comfort termico, il processo di valutazione del rischio, le misure di prevenzione e di protezione, l'indagine tecnica strumentale e la sorveglianza sanitaria; vi è un breve capitolo, inoltre, sulla qualità dell'aria indoor, tema che, comunque, meriterebbe da solo un libro per poter essere trattato adeguatamente. Nella seconda parte di questo manuale vengono riportati, invece, alcuni strumenti di approfondimento "teorico" sugli aspetti trattati nella prima parte. Nell'ultima parte del manuale, infine, forniamo al lettore alcuni strumenti pratici da utilizzare sul "campo" per l'attività di consulenza tecnica.

Non ultimo, vorrei ricordare che questo libro è stato scritto in *peer review* con la LSI Lastem, azienda che dal 1972 si occupa di progettare tecnologie originali per la misura dei parametri microclimatici. Ciò accresce l'importanza di questo manuale, nato proprio dall'idea di dare un supporto teorico e pratico a chi effettua sul "campo" le indagini ambientali di tipo microclimatico.

Francesco Chirico

CAPITOLO 1

Il benessere negli ambienti di lavoro “indoor”

Definizione di ambiente “indoor”

L'ambiente “indoor” è un ambiente confinato di vita e di lavoro non industriale. Gli ambienti indoor sono tutti quegli ambienti adibiti a dimora, lavoro e trasporto regolamentati in Italia dall'Accordo del 27/09/2001 tra il Ministero della Salute, le Regioni e le Province Autonome. Esempi sono rappresentati dalle abitazioni, dagli uffici pubblici e privati, dalle strutture comunitarie (ospedali, scuole, uffici, caserme, alberghi, banche), dagli ambienti destinati ad attività ricreative e sociali (cinema, bar, ristoranti, negozi, strutture sportive) e dai mezzi di trasporto pubblici e/o privati (auto, treno, aereo, nave, ecc.). Gli ambienti confinati di tipo industriale non rientrano, invece, nella definizione di ambiente indoor perché in essi la qualità dell'aria interna è strettamente correlata al tipo di attività produttiva svolta ed è quindi sottoposta a controlli e a leggi specifiche e differenti. Gli ambienti di lavoro indoor sono, quindi, tutti quegli ambienti di vita e di lavoro non industriali nei quali la popolazione trascorre gran parte del proprio tempo subendo, di conseguenza, un contatto prolungato con le potenziali fonti di inquinamento presenti, che possono essere

di varia natura. Secondo la US Environmental Protection Agency (<https://www.epa.gov/>), nei Paesi altamente industrializzati, come per esempio gli Stati Uniti, la popolazione trascorre la gran parte del proprio tempo in ambienti confinati come le abitazioni, gli edifici pubblici e privati ed i mezzi di trasporto. Questa percentuale di permanenza così alta che sfiora il 90% della giornata insieme all'evidenza che in tali Paesi la popolazione già da tempo vive in ambienti per la maggior parte climatizzati e quindi termicamente isolati, ha spinto i ricercatori negli ultimi decenni ad occuparsi delle problematiche relative all'inquinamento dell'aria indoor e, più in generale, al benessere dei lavoratori che occupano gli ambienti di lavoro indoor.

Il benessere negli ambienti di lavoro “indoor”

Il benessere dell'uomo o del lavoratore negli ambienti indoor è dato dalla sommatoria di diverse tipologie di benessere o “comfort”: quello di tipo “termoigrometrico”, quello di tipo “visivo”, quello di tipo “acustico” e quello di tipo “olfattivo”. Come evidenziato dai risultati di un progetto di ricerca europeo, denominato “the OFFICAIR Study”, tutte le componenti dell'ambiente indoor, ovvero quella termica, quella illuminotecnica, quella relativa alla qualità dell'aria (Indoor air quality o IAQ) e quella acustica (soprattutto quest'ultima) sono importanti, sia singolarmente sia considerate nel loro complesso, per il raggiungimento del pieno benessere psico-fisico per i lavoratori che occupano gli ambienti di lavoro “indoor” (Bluyssen et al., 2016). Il termine anglosassone IEQ che sta per Indoor Environmental Quality, infatti, rappresenta la qualità dell'ambiente indoor ed è determinato dalla sommatoria di tutte queste componenti. Per esempio, il benessere visivo è garantito da buone condizioni “illuminotecniche” dell'ambiente di lavoro; infatti, i livelli di illuminamento presso le postazioni di lavoro devono essere sufficienti per consentire il corretto

svolgimento dei compiti lavorativi e non vi devono essere contrasti di luminanza eccessivi tale da causare il fenomeno dell'abbagliamento diretto o indiretto del lavoratore. Ove così non fosse sarebbe favorito, per esempio, il rischio di insorgenza della sindrome astenopica occupazionale nell'operatore addetto all'uso di attrezzature munite di VDT o nell'operatore che deve svolgere compiti visivi ravvicinati, prolungati e che richiedono un importante impegno visivo. Per quanto riguarda il rumore nei luoghi di lavoro indoor, esso, anche se non raggiunge i livelli inferiori di azione (Lex, die=80 dBA) che rappresentano la soglia minima indicata dalla normativa vigente (D.Lgs 81/08) per attivare le prime misure per la prevenzione dei danni uditivi da rumore, può essere comunque responsabile dei cosiddetti “effetti extra-uditivi del rumore”. L'inquinamento acustico, infatti, è costituito dall'insieme di suoni indesiderati in quanto fastidiosi, improvvisi o di intensità eccessiva che rappresentano possibili elementi di disturbo per l'attività di ricezione e di ascolto da parte dell'orecchio umano. Essi possono causare effetti negativi al livello del sistema nervoso centrale ed effetti negativi derivanti dalla reazione aspecifica di stress che si attiva nell'organismo umano quando tali rumori sono presenti durante lo svolgimento da parte del lavoratore di attività mentali che richiedono concentrazione o quando disturbano la voce di conversazione. Il benessere acustico, infatti, è legato ad esigenze di intelligibilità (“voglio essere capito”), concentrazione (“non voglio essere disturbato”) e riservatezza (“non voglio essere ascoltato”). Basti pensare che già un livello di 40 dBA può portare un deficit di alcune capacità psicomotorie ed intellettuali, quali per esempio, un deficit di concentrazione, di operatività, di memorizzazione ed una sensazione di affaticamento. La normativa tecnica per la maggior parte degli uffici prevede, in genere, un valore limite di 55 dBA di esposizione al rumore per la prevenzione degli effetti extrauditivi da rumore.

Il benessere olfattivo, invece, è legato ad un problema più

complesso di “qualità dell’aria” che può essere percepita come “viziata”, “eccessivamente secca/umida” o “con cattivi odori”.

Il problema relativo alla qualità dell’aria sarà trattato in un capitolo a parte (capitolo 6).

Tutte le componenti che incidono sul benessere indoor possono anche influenzarsi reciprocamente. Per esempio, le caratteristiche ambientali di temperatura dell’aria, temperatura media radiante, velocità dell’aria ed umidità relativa, oltre che essere parametri fondamentali per la valutazione del comfort di tipo “termoigrometrico”, possono influenzare le proprietà chimico-fisiche degli inquinanti aerodispersi nell’ambiente “indoor” e possono influenzare la percezione della qualità dell’aria, così come la componente olfattiva ed acustica dell’ambiente indoor possono esercitare un’influenza sulla percezione della qualità termica di tali ambienti.

L’ambiente termico moderato e severo

L’ambiente termico può essere definito come il complesso dei parametri ambientali che influenzano gli scambi termici tra il soggetto e l’ambiente, dando luogo alle sensazioni termiche. Per considerare il fatto che l’ambiente termico non sempre comporta condizioni di comfort, gli ambienti confinati possono essere classificati in moderati e severi (Alfano et al., 1997).

Per ambienti moderati si intendono tutti quelli per i quali l’obiettivo, in sede di progettazione e di gestione, è il raggiungimento delle condizioni di comfort o di benessere termoigrometrico. In tale categoria rientrano gli ambienti civili ad uso abitativo e lavorativo come per esempio gli uffici, le scuole, ecc.

Per ambienti severi, invece, si intendono quelli nei quali è improponibile il raggiungimento del comfort termico, per cui l’obiettivo è la tutela della salute dei lavoratori presenti

che possono essere a rischio di stress termico “da caldo” (per es. forni, miniere, cementifici...) o “da freddo” (per es. celle frigorifere). Il lavoro all’aria aperta (“outdoor”) è il tipico ambiente severo che espone ad entrambe le forme di stress termico, sia da caldo sia da freddo.

Gli ambienti severi sono stati anche definiti “vincolati”, in quanto in essi esistono specifiche esigenze produttive o elementi naturali (outdoor) che, vincolando uno o più dei parametri microclimatici (principalmente la temperatura, ma anche l’umidità, la temperatura radiante, l’attività fisica e l’abbigliamento), impediscono di fatto che l’obiettivo del comfort sia realisticamente perseguibile. All’opposto, negli ambienti moderati non esistono esigenze produttive o vincoli naturali che pregiudichino il raggiungimento del comfort termico e, proprio per tale ragione, alcuni ricercatori hanno definito tali ambienti “moderabili” (e non “moderati”) per evidenziare il fatto che alcuni di essi, senza che vi siano particolari “vincoli” che pregiudichino il raggiungimento del comfort, per un errore di progettazione e/o una gestione poco attenta, possono presentare forti deviazioni dalle condizioni di “comfort”. Così tali ambienti, moderabili ma non moderati, sono stati anche definiti “impegnativi”, in quanto richiedono l’impegno da parte del sistema termoregolatorio dell’organismo umano (per esempio attraverso il meccanismo della sudorazione) per raggiungere l’equilibrio termico (Lenzuni, 2006). Gli ambienti “impegnativi”, tranne che in casi eccezionali, non inducono uno stato di stress termico. Pertanto essi non possono essere valutati mediante gli indici di stress termico, ma nemmeno attraverso il metodo PMV/PPD tipicamente usato per valutare gli ambienti moderati. Ecco, quindi, che per tali ambienti indoor, soprattutto se caldo-umidi, è stato proposto l’uso di alcuni indicatori come l’indice Umidex o l’indice di calore (Heat Index) che, messi a punto per gli ambienti outdoor, basandosi sulla combinazione di temperatura ed umidità, potrebbero, tuttavia, essere utili in un

certo qual modo anche per gli ambienti moderabili “impegnativi” (Lenzuni, 2006).

CAPITOLO 2

La teoria del bilancio termico

La neutralità termica

La neutralità termica rappresenta la temperatura ambientale alla quale la temperatura corporea si mantiene ottimale con la semplice quantità di calore prodotta dal metabolismo basale e corrisponde, per un individuo svestito, a $\sim 29^{\circ}\text{C}$.

L'omeotermia

L'uomo è immerso in un ambiente esterno, confinato o meno che sia, con il quale scambia continuamente calore. Da una parte, infatti, cede il calore metabolico e dall'altro lo assorbe dall'ambiente. In tal modo si realizzano una serie di continui interscambi termici. L'uomo, però, a differenza degli animali "poichilotermi" che acquisiscono la temperatura dell'ambiente in cui vivono, in quanto mammifero è un "animale omeotermo": deve cioè continuamente adattarsi all'ambiente esterno, per far sì che la propria temperatura corporea si mantenga entro determinati limiti che sono necessari al corretto svolgimento delle proprie funzioni fisiologiche e per il mantenimento della sua stessa sopravvivenza.

L'organismo umano può essere diviso in due zone, una interna detta "core" dove sono collocati gli apparati "vitali" (come quello nervoso, cardiocircolatorio e digerente) ed una esterna detta "shell" costituita dalla cute e dai tessuti sottocutanei. A tali zone corrisponderanno due temperature differenti: quella "interna" (orale, anale) e quella "esterna" o cutanea (ascellare). Mentre per la temperatura dell'epidermide e del tessuto sottocutaneo sono fisiologicamente tollerabili anche variazioni di 4-5 °C, la variazione della temperatura del nucleo interno corporeo non può essere superiore ad 1-2 °C (in condizioni di equilibrio termico la temperatura interna rimane costante a 36,5 °C ± 0,5). D'altra parte il mantenimento della temperatura corporea a 37 °C è necessario all'organismo umano per il regolare funzionamento delle cellule; infatti, se il citoplasma cellulare può anche sopportare (in condizioni patologiche) aumenti di temperatura fino a 41-42 °C, non è così per il nucleo che è sensibile anche a lievi aumenti di temperatura. Pertanto, l'omeotermia consente all'uomo di mantenere costante la temperatura del nucleo interno corporeo (visceri endodominanti e sistema nervoso centrale) anche in presenza di condizioni climatiche sfavorevoli, mentre la temperatura delle estremità corporee (arti e cute) è estremamente variabile in funzione della temperatura esterna.

Il bilancio termico

L'omeotermia è l'espressione del bilancio termico in pareggio, tra entrate e uscite del calore che l'organismo produce e riceve dall'ambiente e di quello disperso e ceduto all'ambiente stesso.

L'equazione che può spiegarlo in forma sintetica è la seguente:

$$B = M \pm C \pm R - E$$

dove B è il bilancio termico, M è il calore di produzione metabolica (può essere solo positivo e dipende dal tipo di attività svolta dal soggetto, dall'alimentazione e dal suo stato di salute), E indica il calore disperso attraverso l'evaporazione (è sempre negativo perché può essere solo disperso con la sudorazione e/o la respirazione), C ed R rappresentano rispettivamente il calore di conduzione/convezione e di irraggiamento che, invece, possono essere positivi se gli scambi termici sono diretti dall'ambiente all'uomo o negativi in caso contrario.

Il bilancio energetico del corpo umano, quindi, può essere espresso in una forma più complessa:

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

Dove S è la differenza tra la potenza termica accumulata e quella ceduta dal corpo, M è la potenza termica prodotta dal metabolismo, W è la potenza meccanica impegnata per compiere lavoro meccanico, C_{res} è la potenza termica scambiata nella respirazione per convezione, E_{res} è la potenza termica scambiata nella respirazione per evaporazione, K è la potenza termica scambiata per conduzione, C è la potenza termica scambiata per convezione, R è la potenza termica scambiata per irraggiamento, E è la potenza termica ceduta per evaporazione (traspirazione e sudorazione). Il termine + indica un guadagno di energia, il termine - indica una perdita di energia.

La condizione di omeotermia si realizza quando S è pari a 0, quando cioè l'energia prodotta e acquisita dal corpo umano sarà pari a quella ceduta all'ambiente esterno. Se S è >0 avremo una sensazione di caldo, se S è <0 avremo una sensazione di freddo. Se S è pari a 0 avremo una sensazione termicamente "neutra".