

Il bilancio termico dell'organismo ed i parametri soggettivi

1. Premessa

Viene trattata in sintesi l'equazione del bilancio termico dell'organismo, che tende a mantenere una situazione di neutralità termica per raggiungere l'omeotermia.

Di seguito vengono illustrati i vari meccanismi fisiologici, che l'organismo umano utilizza per mantenere lo stato di equilibrio termico.

Inoltre vengono illustrati in sintesi i metodi diretti ed indiretti per una corretta determinazione dei parametri soggettivi necessari per la valutazione del comfort termico, cioè il dispendio metabolico, l'isolamento termico dovuto al vestiario e il rendimento meccanico.

2. L'equazione del bilancio termico

Il corpo umano può essere definito come un sistema contenente un nucleo produttore di calore, costituito dagli organi vitali, circondato da un rivestimento di tessuti che lo isolano dall'ambiente esterno.

Gli organi vitali sono efficienti ad una temperatura di circa 37°C; è possibile, tuttavia, che tale valore possa variare in funzione di specifiche condizioni temporanee (esercizio fisico, età, stress emotivi, digestione, alterazioni del battito cardiaco o cicliche nelle donne, temperatura ambientale, ecc.). L'organismo, attraverso la termoregolazione controllata dall'ipotalamo, è in grado di mantenere la temperatura interna entro un ristretto intervallo.

La situazione termica dell'organismo può essere schematizzata come un sistema aperto agli scambi di energia verso l'esterno, che avvengono per lo più sotto forma di calore entrante o uscente e di energia meccanica prodotta con l'attività fisica svolta.

L'equazione del bilancio termico esprime la sommatoria S dei flussi di calore ed energia e si calcola sommando il contributo determinato dal calore prodotto dai processi metabolici all'energia determinata dall'attività fisica, al calore scambiato per convezione e/o irraggiamento con l'ambiente, per conduzione con altri corpi con cui l'organismo si trova in contatto e, infine, scambiato per effetto della sudorazione e della respirazione.

Nella condizione di bilanciamento reciproco dei flussi di calore si raggiunge lo stato di omeotermia, condizione essenziale per lo svolgimento delle varie funzioni e processi vitali; in questo stato, con riferimento alle condizioni di lavoro, il livello di attenzione del lavoratore è ottimale e di conseguenza si riduce la probabilità di incidenti e infortuni.

L'organismo tende a conservare la condizione di neutralità termica attivando specifici processi (vasodilatazione periferica, sudorazione, brividi) per controllare la perdita o l'acquisizione di calore.

Nella maggior parte delle situazioni i valori del dispendio metabolico **M**, del rendimento meccanico η o del calore scambiato per convezione **C** ed irraggiamento **R** e per evaporazione **E** tendono a prevalere, quindi l'equazione di bilancio termico si approssima in:

$$S = M + \eta + C + R + E$$

dove η , si ricorda, è la percentuale di energia metabolica prodotta trasformata in energia meccanica.

3. I meccanismi di termoregolazione

La specie umana appartiene a quella categoria di organismi viventi definiti come omeotermi; si tratta di quei sistemi biologici che sono in grado di mantenere, entro certi limiti, la propria temperatura costante rispetto alle variazioni di temperatura ambientale.

Questi organismi superiori sono, quindi, in grado di svolgere le varie funzioni vitali anche a temperature estremamente basse, cosa che non è consentita agli organismi eterotermi.

L'insieme dei processi e meccanismi che consente di mantenere la condizione di omeotermia, prende il nome di termoregolazione biologica.

La termoregolazione si realizza nell'equilibrio dinamico tra la produzione di energia termica e la cessione di calore all'ambiente.

Le reazioni biochimiche rappresentano le vie attraverso le quali un organismo vivente riesce a utilizzare l'energia per mantenersi in vita e svolgere tutte le sue funzioni.

Nelle reazioni chimiche dei processi metabolici, mentre una parte dell'energia viene direttamente utilizzata, una parte resta inutilizzata e deve essere restituita all'ambiente.

Innanzitutto va precisato che all'interno del corpo vi sono zone con diversa attività metabolica e, di conseguenza, diversa temperatura; ciò rende necessaria l'uniformità di questo parametro nei diversi distretti dell'organismo; tale problema è risolto dalla circolazione del sangue, che riveste anche la funzione di un sistema di "convezione forzata"; il liquido circolante si riscalda nei distretti a temperatura più elevata e cede calore in quelli più freddi; pertanto, in prima approssimazione, si può ritenere che l'organismo mantenga una temperatura uniforme in tutte le sue parti.

Tutti quei fattori che possono influenzare i processi metabolici provocano, indirettamente, una variazione nella velocità di produzione di energia termica; questo controllo può essere realizzato a livello dei processi metabolici nei diversi tessuti oppure, anche volontariamente, attraverso l'esercizio muscolare; quest'ultimo è l'unico meccanismo che può rapidamente portare alla liberazione di elevate quantità di energia e consente di contrastare condizioni ambientali sfavorevoli (temperatura ambientale molto inferiore a quella dell'organismo).

L'unico mezzo di cui l'organismo dispone per trasferire l'energia termica da esso prodotta all'ambiente è quella del calore; pertanto quando la temperatura dell'ambiente è inferiore a quella corporea possono essere utilizzati i meccanismi spontanei di trasmissione del calore, quali la conduzione e l'irraggiamento; tuttavia la situazione è diversa se la temperatura ambiente è superiore a quella corporea.

In questo caso la sottrazione di calore dall'organismo può avvenire mediante un altro processo di mediazione, ovvero la sudorazione; per mezzo di tale meccanismo viene portata alla superficie del corpo una certa quantità d'acqua che evapora nell'ambiente.

Il processo di vaporizzazione è accompagnato da una riduzione della temperatura del liquido; il sudore, inizialmente a temperatura corporea, si raffredda evaporando e determina, tra l'interno e la pelle, il salto di temperatura necessario a che si possa attuare la conduzione di calore verso l'esterno.

Poiché l'evaporazione si riduce con l'aumentare dell'umidità dell'ambiente, la quantità di energia sottratta può essere fortemente limitata dalle condizioni atmosferiche, fino ad esserne impedita quando l'umidità relativa è pari al 100%.

Sia il ritmo di produzione che quello di smaltimento dell'energia termica possono essere variati; il primo attraverso alterazioni nel numero e nella velocità dei processi metabolici, il secondo mediante un controllo sui processi di trasmissione del calore all'ambiente.

Questi ultimi dipendono dal gradiente termico organismo-ambiente, dalla conducibilità termica della pelle e del mezzo a contatto con questa, dalla radianza e dal fattore di assorbimento della pelle. Per controllare l'entità della corrente termica verso l'ambiente si deve agire dunque su tali parametri; considerando che le caratteristiche dell'ambiente non sono, in generale, modificabili, l'organismo deve provvedere mediante il proprio adattamento.

Modificazioni del gradiente termico possono essere ottenute mediante variazioni dell'entità del flusso sanguigno superficiale; infatti una riduzione del flusso alla superficie corporea determina una riduzione della temperatura di questa.

L'aumento dello spessore dello strato in cui avviene la conduzione comporta una riduzione della corrente termica; anche l'irraggiamento viene ridotto perché la quantità di energia irradiata dipende dalla temperatura dello strato superficiale della pelle e non dalla temperatura interna.

Modificazioni dei coefficienti di conducibilità termica e dei fattori di assorbimento e di radianza dello strato superficiale dell'organismo sono, infine, possibili a causa di

variazioni di pigmentazione e dell'ischemia provocata dalla vasocostrizione superficiale.

4. I parametri soggettivi

Per ricavare un quadro verosimile della situazione microclimatica all'interno degli ambienti lavorativi è necessario determinare, con la massima precisione, i valori dei parametri soggettivi necessari alla valutazione, cioè del tasso metabolico **M** (o dispendio metabolico), dell'isolamento termico dovuto al vestiario **I_{cl}** e del rendimento meccanico dell'organismo η , fondamentali per ottenere risultati realmente descrittivi del fenomeno in esame.

Il dispendio metabolico (ovvero la quantità totale di energia prodotta dall'organismo) rappresenta uno dei parametri fondamentali della valutazione. L'organismo ha un tasso di metabolismo basale legato alle funzioni vitali e un tasso di metabolismo energetico legato all'attività svolta. Il tasso metabolico viene determinato sia con metodi diretti, ad esempio misurando il quantitativo di ossigeno consumato, sia con metodi indiretti, basati sull'uso di prospetti di riferimento. Nei metodi di tipo indiretto la semplicità dell'applicazione è accompagnata da un margine di imprecisione, strettamente correlato all'esperienza di chi effettua la valutazione; nella tabella 1, ripresa dalla norma UNI EN ISO 8996:2022, sono elencati i diversi metodi di determinazione del tasso metabolico **M**, la loro precisione ed il loro livello di accuratezza.

Tabella n.1*	Metodi per la determinazione del dispendio metabolico		
Livello	Metodo	Precisione	Ispezione del posto di lavoro
1 Controllo	Classificazione secondo il tipo di attività	Informazioni approssimative Rischio di errore molto elevato	Non necessaria
2 Osservazione	Analisi dei tempi e dei movimenti	Rischio di errore elevato Incertezza $\pm 20\%$	Necessaria
3 Analisi	3A.Misurazione della frequenza cardiaca sotto condizioni definite	Rischio medio di errore Incertezza: da ± 10 a 15%	Necessaria analisi per determinare un periodo di tempo rappresentativo
	3B.Accelerometria	Rischio di errore elevato	
4 Valutazione di esperti	4A. Misurazione del consumo di ossigeno	Errori entro i limiti di precisione della misura o dell'analisi dei tempi e dei movimenti, se rispettate le condizioni dei punti 9.1.1, 9.1.4 Incertezza $\pm 5\%$	Necessaria l'analisi dei tempi e dei movimenti
	4B. Metodo della doppia marcatura dell'acqua		Non necessaria l'ispezione della postazione di lavoro; necessario valutare le attività durante le pause
	4C. Calorimetria diretta	Errori entro i limiti della precisione della misura o dell'analisi dei tempi e dei movimenti Incertezza $\pm 5\%$	Non necessaria

*Fonte: Table 1 – UNI EN ISO 8996:2022

Nota: l'incertezza di ciascun metodo è fornita in Tabella n. 1 come coefficiente di variazione, cioè la percentuale di deviazione standard dalla media; i valori devono essere intesi come indicativi.

In una valutazione microclimatica accurata occorre, quindi, analizzare i dati assumendo una "figura metabolica" rappresentativa delle attività della mansione indagata, attribuendo a questa figura tipo un valore appropriato del dispendio metabolico.

Nella valutazione più generica (ad esempio quella di livello 1 della tabella n. 1) il valore del dispendio metabolico M della mansione indagata è determinato in base a prospetti riferiti alle diverse lavorazioni. Un esempio di tali prospetti è riportato in tabella 2 con riferimento alle attività di ufficio.

Tabella n.2	Prospetto per l'attribuzione del valore di M alle diverse mansioni (1 metabolic unit = 1 met = 50 Kcal/h m ₂ = 58,2 W/m ₂)	
Tipo di attività	W/m ²	Met
Lavoro sedentario	55 - 65	0,9 - 1,1
Lavoro impiegatizio	65 -100	1,1 - 1,7
Portiere	80 -115	1,4 - 2,0

Nella valutazione di tipo 2, di cui alla tabella n. 3, viene considerato nel dettaglio il contributo di ogni singola componente di un'attività lavorativa (postura, energia metabolica basale, tipo di attività, movimento del corpo, ecc.). Tale metodologia è indicata per le attività di tipo prevalentemente ripetitivo.

Nel caso delle attività di ufficio si può assumere un valore di M pari a circa 2,0, così come risulta dalla tabella n.3, dove è riportato un esempio di determinazione del dispendio metabolico M con questo metodo per questo tipo di attività.

Tabella n.3	Esempio di applicazione del metodo 2 per la determinazione del valore di M	
	W/m ²	Met
Tasso metabolico basale	45	0,77
Tasso metabolico per la postura (seduto)	0	0
Tasso metabolico per l'attività (lavoro manuale leggero)	70	1,21
Tasso metabolico per lo spostamento	0	0
Totale dispendio metabolico	115	1,98

Quando si usa un metodo come quello sopra descritto occorre valutare in ogni caso le pause lavorative e, nel caso di attività lavorative disomogenee, effettuare una media ponderata in funzione del tempo impiegato per le diverse attività.

Nell'analisi dei dati microclimatici è di fondamentale importanza stimare correttamente l'isolamento termico dovuto al vestiario (Icl).

Durante i rilievi è pertanto necessario prendere nota del vestiario indossato dai vari lavoratori al fine di valutare il contributo all'isolamento termico. Da appositi prospetti presenti nelle norme tecniche (UNI EN ISO 7730:2006; UNI EN ISO 9920:2009) si ricavano i valori tipici dell'isolamento dei singoli capi di abbigliamento, misurati

nell'unità di misura Clo (1 clothing unit = 1 clo = 0,155 m² °C/W = 0,180 m² °C h/Kcal); è importante identificare anche il tipo di tessuto, che influenza notevolmente il grado di isolamento. Nella tabella 4 è riportato un esempio di calcolo del suddetto indice per un impiegato in ambiente di ufficio.

Tabella n.4	Esempio di calcolo per la determinazione del valore di Icl per un impiegato
Capi di abbigliamento	Clo
Giacca leggera	0,25
Camicia leggera a maniche lunghe	0,20
Pantaloni lunghi	0,25
Calzini	0,02
Mutande	0,03
Scarpe chiuse	0,04
Totale	0,79

Durante l'attività lavorativa gran parte dell'energia metabolica viene trasformata in calore, mentre solo una frazione minima viene convertita in energia meccanica (lavoro utile).

Anche per la determinazione del rendimento meccanico η si può far riferimento a diversi metodi di valutazione che permettono di attribuire il corretto valore di rendimento meccanico alle diverse tipologie di lavorazioni.

Il campo di variabilità del rendimento meccanico oscilla tra lo 0% e il 25% dell'attività metabolica: ai fini della valutazione del benessere termico tale parametro assume importanza per lavorazioni molto pesanti, nelle quali l'energia meccanica in gioco assume valori significativi.

Nel caso di lavori sedentari, come i lavori di ufficio, si può attribuire un rendimento meccanico pari allo 0 %.

Bibliografia

- AA. VV. (Coordinamento Tecnico interregionale della Prevenzione dei luoghi di lavoro 2006) - Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro: requisiti e standard, indicazioni operative e progettuali. Atti del Convegno DBA 2006: rischi fisici negli ambienti di lavoro, volume 2 – Microclima. Modena, 12-13 Ottobre 2006
- ALFANO G., D'AMBROSIO F. R., RICCIO G. (1998) – Disagio e stress termico: effetti, normative, valutazione e controllo. Atti del Convegno DBA "Dal rumore ai rischi fisici", Modena, 17-19 Settembre 1998, 531-553

- BARBATO F. (1998) – La valutazione dell’ambiente termico inserita nel programma di valutazione dei rischi. Atti del Convegno DBA “Dal rumore ai rischi fisici”, Modena, 17-19 Settembre 1998, 573-596
- UNI EN ISO 7730 (2006) – Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.
- UNI EN ISO 8996 (2022) – Ergonomia dell’ambiente termico – Determinazione del metabolismo energetico.
- UNI EN ISO 9920 (2009) – Ergonomia dell’ambiente termico – Valutazione dell’isolamento termico e della resistenza evaporativa dell’abbigliamento.

(La riproduzione di stralci delle norme UNI è stata autorizzata da UNI Ente Italiano di Normazione. L'unica versione che fa fede è quella originale reperibile in versione integrale presso UNI, Via Sannio 2 20137 Milano, tel.02-70024200, e-mail: vendite@uni.com, web www.uni.com).

Data di chiusura del documento

30/05/2022

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell’Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

Per informazioni

contarp@inail.it