

Il Bilancio Energetico del Corpo Umano

Analisi quantitativa del Metabolismo e della Termoregolazione

A cura di Giancarlo Buccella



Indice

1. Introduzione
 2. Principi Fondamentali
 3. Metabolismo Basale e Totale
 4. Apporti Energetici
 5. Dispendio Energetico
 6. Termoregolazione
 7. Bilancio Energetico e Peso Corporeo
 8. Fattori che Influenzano il Bilancio
 9. Conclusioni
-

Introduzione

Il corpo umano è un sistema complesso che, come ogni macchina, ha bisogno di energia per funzionare. Questa energia proviene principalmente dal cibo che ingeriamo e viene spesa attraverso una serie di processi fisiologici e attività quotidiane. Comprendere il bilancio energetico è fondamentale per mantenere uno stato di salute ottimale e prevenire malattie legate a squilibri energetici, come obesità o malnutrizione.

Il bilancio energetico del corpo umano è la differenza tra l'energia introdotta con l'alimentazione e l'energia consumata dal corpo. Un bilancio positivo (più calorie introdotte che consumate) porta ad un aumento di peso, mentre un bilancio negativo (più calorie consumate che introdotte) porta alla perdita di peso. Un bilancio energetico equilibrato, invece, permette il mantenimento del peso corporeo.

Il bilancio energetico del corpo umano rappresenta uno dei principi fondamentali della fisiologia umana e costituisce la base per comprendere i meccanismi che regolano il peso corporeo, la performance fisica e la salute metabolica. Questo equilibrio dinamico tra energia introdotta e energia consumata determina se un individuo mantiene, aumenta o diminuisce il proprio peso corporeo.

Il corpo umano può essere considerato come un sistema termodinamico aperto, ossia che scambia continuamente energia e materia con l'ambiente circostante. L'energia viene introdotta attraverso gli alimenti e viene utilizzata per mantenere le funzioni vitali, sostenere l'attività fisica e regolare la temperatura corporea.

La comprensione quantitativa di questi processi è essenziale non solo dal punto di vista teorico, ma anche per applicazioni pratiche in ambito clinico, sportivo e nutrizionale. La capacità di calcolare con precisione il fabbisogno energetico individuale e di predire le variazioni del peso corporeo in risposta a modifiche dell'apporto calorico o dell'attività fisica rappresenta uno strumento fondamentale per la gestione della salute e della performance.

Il corpo umano è un sistema complesso che, come ogni macchina, ha bisogno di energia per funzionare. Questa energia proviene principalmente dal cibo che ingeriamo e viene spesa attraverso una serie di processi fisiologici e attività quotidiane. Comprendere il bilancio energetico è fondamentale per mantenere uno stato di salute ottimale e prevenire malattie legate a squilibri energetici, come obesità o malnutrizione.

L'energia è necessaria non solo quando una persona è fisicamente attiva, ma anche quando il corpo è sdraiato immobile. A seconda del livello di attività fisica di un individuo, tra il 50 e l'80% dell'energia spesa ogni giorno è dedicata ai processi metabolici di base (metabolismo basale), che consentono al corpo di mantenersi caldo, respirare, pompare sangue e svolgere numerose attività fisiologiche e biosintetiche, tra cui la sintesi di nuovi tessuti nei bambini in crescita e nelle donne in gravidanza e allattamento. Anche la digestione e la successiva elaborazione del cibo da parte dell'organismo consumano energia e producono calore. Questo fenomeno, noto come effetto termico del cibo (o termogenesi indotta dalla dieta), rappresenta circa il 10% del dispendio energetico giornaliero, variando leggermente a seconda della composizione della dieta e delle abitudini alimentari precedenti. Infine, la componente più variabile del dispendio energetico è l'attività fisica, che include esercizio fisico e altre attività volontarie, nonché attività involontarie come agitarsi, tremare e mantenere la postura. L'attività fisica rappresenta dal 20 al 40% del dispendio energetico totale, una percentuale ancora inferiore in una persona molto sedentaria e maggiore in una persona estremamente attiva.

Principi Fondamentali

Prima Legge della Termodinamica

Il bilancio energetico del corpo umano è governato dalla prima legge della termodinamica, che stabilisce il principio di conservazione dell'energia, esso afferma che l'energia non può essere creata né distrutta, ma solo trasformata da una forma all'altra o trasferita da un sistema all'altro, applicata al corpo umano, questa legge può essere espressa come:

$$\Delta U = E_{in} - E_{out} \quad (1)$$

Dove:

- ΔU = variazione dell'energia interna
- E_{in} = energia introdotta (alimentazione)
- E_{out} = energia ceduta all'ambiente (sotto forma di calore e lavoro)

Questa considerazione discende dal considerare la seguente relazione, che fonda il primo principio, che nella sua forma standard è la seguente:

$$\Delta U = Q - L \quad (2)$$

dove ΔU è la variazione di energia interna del sistema (U è la somma dell'energia cinetica e potenziale di tutte le particelle del sistema), i valori di Q ed L possono essere sia positivi che negativi; secondo la convenzione dei segni Q negativo se ceduto, positivo se assorbito e viceversa per L .

Q è il calore scambiato (assorbito o ceduto) con l'ambiente esterno

L è il lavoro meccanico scambiato (assorbito o ceduto) con l'ambiente esterno

Quindi Q ed L vanno inseriti nella (2) con il loro segno.

Se consideriamo l'intero universo, esso è un sistema chiuso, in quanto proprio per definizione di universo non esiste un ambiente esterno ad esso, quindi il secondo membro sarà nullo: $\Delta U = 0$ e questo significa che ci sarà nessuna variazione dell'energia interna del sistema, ossia il suo contenuto energetico rimane costante; ecco quindi da dove nasce l'affermazione che nulla si crea e nulla si distrugge ma tutto si trasforma.

Per un organismo in equilibrio $\Delta U = 0$, esso mantiene il proprio peso costante e non ci sarà diminuzione o aumento di energia interna. Siccome la vita dell'organismo ha bisogno di un continuo apporto di energia vi dovrà essere un qualche meccanismo interno al corpo tale da rifornire continuamente "le perdite energetiche", tale meccanismo è il metabolismo, ossia quel processo che "trasforma" il cibo ingerito in energia. La relazione (2) è la formulazione classica del primo principio della termodinamica, esso descrive un sistema che scambia solo lavoro e calore con l'ambiente, ma

nel nostro caso il corpo riceve energia dall'ambiente (dall'assunzione di cibo), per tener conto di questo termine la relazione diventa:

$$\Delta U = E_{in} + Q - L \quad (3)$$

Questa relazione è la formulazione del Primo principio della termodinamica esteso ai sistemi aperti, in cui cioè avviene un "rifornimento" di energia dall'esterno.

Se poniamo:

Energia in entrata = E_{in} = energia chimica contenuta nei cibi + calore assorbito + lavoro assorbito

Energia in uscita = E_{out} = calore ceduto + lavoro fatto sull'ambiente

Allora la (3) diventa

$$\Delta U = E_{in} + E_{out}$$

Ritrovando la (1).

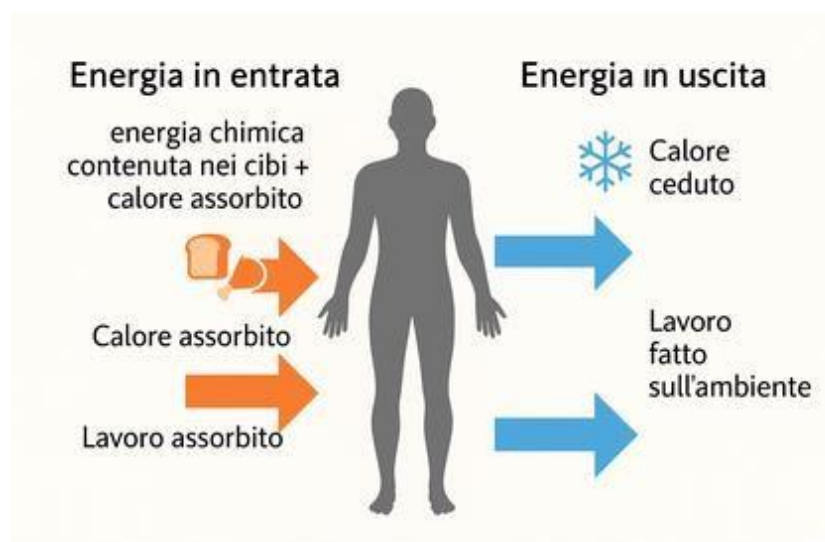
Calore assorbito: quando la temperatura del corpo è inferiore a quella dell'ambiente, ad esempio quando se si è in una sauna o semplicemente esposti al sole o sotto una lampada solare...

Lavoro assorbito: massaggio meccanico (è una macchina agisce sul corpo, comprimendo e rilasciando muscoli), terapia ad ultrasuoni è energia meccanica oscillante trasferita ai tessuti...

Calore ceduto: quando la temperatura del corpo è superiore a quello dell'ambiente, ad esempio quando si è accaldati, (esercizio fisico, esposizione a fonti di calore) il corpo sudando cede calore all'ambiente, quando si è all'aperto in inverno...

Lavoro ceduto: quando si fa ad esempio un lavoro meccanico contro la gravità (sollevare pesi), camminare, correre, parlare, scrivere...

Graficamente



Quando si dice che "l'energia in entrata deve uguagliare quella in uscita", si sta implicitamente assumendo che sia $\Delta U = 0$, cioè che non ci sia variazione dell'energia interna del corpo.

Per quanto concerne il lavoro assorbito che rappresenta l'energia meccanica ricevuta dall'esterno (se una persona viene spinta o sollevata da una forza esterna, sta ricevendo lavoro, ad esempio, essere trasportati passivamente su una sedia a rotelle o essere sollevati da un'altra persona o da un macchinario sono esempi di lavoro compiuto sul corpo), esso non viene immagazzinato come energia interna a meno di casi molto particolari, (come ad esempio essere sottoposti ad una fonte sonora molto intensa, infatti le onde sonore esercitano una pressione sul corpo trasferendo così energia, o anche durante un massaggio, in tal caso ai muscoli viene applicata una forza trasferendo così lavoro), e comunque anche in questi casi marginali l'entità di energia trasferita è veramente minimale per cui è del tutto lecito trascurare il lavoro assorbito.

Rispetto invece al calore assorbito possiamo affermare che è anch'esso trascurabile, infatti in ambienti normali, la temperatura esterna è uguale o inferiore a quella corporea, quindi il corpo cede calore (non lo assorbe). Solo in ambienti molto caldi (es. sauna, deserto) il corpo può assorbire un po' di calore che in genere viene dissipato immediatamente.

Conclusione: in condizioni normali, sia il lavoro che il calore assorbito sono del tutto trascurabili.

[N.B. Si potrebbe pensare che la temperatura esterna ottimale fosse quella corporea di 37 °C, infatti fra due corpi alla stessa temperatura non vi è transito di calore e quindi sembrerebbe la situazione ideale di equilibrio termico. Ma non è così a causa del fatto che la sensazione di caldo non dipende solo dalla temperatura assoluta dell'ambiente, ma dal fatto che la capacità del corpo di dissipare calore diminuisce man mano che la temperatura esterna si avvicina ai 37 °C. A 30–32 °C: l'aria è già molto vicina alla temperatura del corpo. L'irraggiamento e la convezione non bastano più. Il corpo attiva la sudorazione come principale strategia di raffreddamento. Se l'umidità è alta, il sudore non evapora facilmente ci sentiamo ancora più accaldati. A 37 °C (o oltre): non solo non perdiamo più calore all'ambiente, ma potremmo assorbirne. Il corpo è costretto a sudare continuamente. In mancanza di evaporazione efficace, si rischia ipertermia.]

Riprendendo la relazione (3) e considerando che come abbiamo detto il calore e lavoro saranno essenzialmente quelli ceduti all'ambiente, in base alla convezione sui segni, L sarà positivo e Q negativo, per cui avremo

$$\Delta U = E_{in} - Q - L = E_{in} - (Q + L) = E_{in} - E_{out}$$

Q ed L al secondo membro sono entrambi negativi e pertanto essi rappresentano l'energia in uscita. Se ad esempio $(Q + L) > E_{in}$ l'energia interna deve diminuire ($\Delta U < 0$) e viceversa.

Equazione del Bilancio Energetico

Il sistema termodinamico “corpo umano” produce calore e lavoro attraverso la sua attività metabolica (metabolismo base + energia per la digestione) e il suo movimento muscolare (attività fisica). Con queste premesse è possibile scrivere l'equazione fondamentale del bilancio energetico che, nel caso di pareggio fra energia in entrata ed energia in uscita, è:

$$E_{in} = E_{out} \equiv BMR + TEF + A \quad (4)$$

- E_{in} = energia introdotta con il cibo (kcal/giorno)
- BMR = metabolismo basale (Basal Metabolic Rate)
- TEF = effetto termico degli alimenti (Thermic Effect of Food) cioè l'energia spesa per la digestione
- A = attività fisica volontaria e involontaria

Se il bilancio non è a pareggio, indicando con ΔS il “disavanzo”, la (4) diventa:

$$\Delta S = E_{in} - E_{out} = E_{in} - (BMR + TEF + A) \quad (5)$$

A parole: l'energia che entra nell'organismo meno l'energia spesa è uguale al disavanzo, che può essere positivo (aumento di peso), negativo (perdita di peso) o nullo (situazione stazionaria).

Il termine riguardante l'attività motoria (A) viene diviso in due contributi:

- TEA: attività fisica programmata (Thermic Effect of Activity)
- NEAT: termogenesi non associata all'attività fisica programmata (Non-Exercise Activity Thermogenesis)

Allora possiamo riscrivere la (1) esplicitando la A nelle sue due componenti, avendosi:

$$E_{in} = BMR + TEF + TEA + NEAT \quad (6)$$

Ma come raccordare questa relazione con la (3)? Basta considerare che BMR e TEF sono attività che non producono lavoro meccanico, pertanto tutta l'energia consumata dal BMR + TEF deve essere convertita in qualcos'altro, questo qualcos'altro è il calore, Il BMR è la principale fonte di calore che ci permette di mantenere la nostra temperatura corporea costante intorno ai 37°C.

Soffermiamoci un attimo su questo aspetto.

Il BMR rappresenta l'energia spesa per compiere un'enorme quantità di "lavoro" che però rimane confinato all'interno del nostro corpo. Questo include:

Sintesi di molecole: Costruire nuove proteine, ormoni, neurotrasmettitori, enzimi, ecc.

Trasporto attivo: Le famose pompe ioniche (come la pompa sodio-potassio) che consumano ATP per mantenere i gradienti elettrici e chimici attraverso le membrane cellulari, fondamentali per la funzione nervosa e muscolare.

Attività elettrica: L'attività incessante del cervello e del sistema nervoso.

Replicazione e riparazione cellulare: La continua sostituzione di cellule vecchie.

Contrazione dei muscoli involontari: Il cuore che pompa sangue, il diaframma per la respirazione.

Tutte queste sono attività vitali ed energeticamente dispendiose. Dal punto di vista della termodinamica, che guarda al sistema "corpo" nel suo insieme e ai suoi scambi con l'esterno, tutto questo lavoro interno, alla fine, si degrada in calore all'interno del corpo stesso. Perché?

Inefficienza dei Processi: nessuna conversione di energia è efficiente al 100%. Quando l'ATP viene usato per alimentare la pompa sodio-potassio, una parte dell'energia compie il "lavoro" di spostare gli ioni, ma un'altra parte viene immediatamente persa come calore a causa dell'inefficienza del processo chimico.

Lavoro a circuito chiuso: si pensi al cuore. Esso compie un lavoro meccanico pompando il sangue. Ma questo lavoro è interno al sistema. L'energia cinetica data al sangue viene poi dissipata in calore a causa dell'attrito del sangue contro le pareti dei vasi. Il cuore non sta compiendo un lavoro sull'ambiente esterno. L'effetto netto, per l'intero organismo, è il consumo di energia chimica (dagli alimenti) e la produzione di calore.

Analogia della fabbrica: si può pensare al corpo come a una fabbrica sigillata. L'energia elettrica (cibo) entra. Questa energia alimenta i macchinari (lavoro biologico interno) che assemblano prodotti. Tuttavia, ogni motore, ogni computer, ogni luce in quella fabbrica, mentre funziona, produce calore. Se ci si mette fuori dalla fabbrica e si misura l'energia che esce, non si vedrà uscire "lavoro", ma solo calore dissipato dalle pareti. L'energia è stata usata per scopi vitali all'interno, ma il suo sottoprodotto finale, misurabile dall'esterno, è il calore.

Il BMR rappresenta l'energia utilizzata per compiere tutto il lavoro biologico interno necessario a mantenerci in vita. A causa delle leggi della termodinamica, il risultato netto di tutta questa attività interna è la continua produzione di calore.

Per quanto riguarda l'attività muscolare occorre precisare che esso è un processo inefficiente in quanto produce solo il 20 % di lavoro meccanico, il restante 80% viene disperso sotto forma dell'unico altro modo di trasferire energia, cioè di calore.

Quindi la (3) diventa (considerando il caso in cui il calore venga ceduto all'ambiente)

$$\Delta U = E_{in} - [L (20\% A) + Q (BMR+TEF+80\%A)] \quad (7)$$

Il calore Q, come vedremo, verrà ceduto all'ambiente tramite diversi processi di scambio.

Unità di Misura

L'energia, nei processi in cui interviene il calore, viene comunemente misurata in:

Caloria (cal): quantità di energia necessaria per innalzare di 1°C la temperatura di 1 g d'acqua distillata da 14,5 °C a 15,5 °C, alla pressione atmosferica normale (detta in passato "piccola caloria" (cal) per distinguerla dalla "grande caloria" (Cal), pari a 1 kcal);

$$1\text{Cal} = 1000 \text{ cal} = 1 \text{ kcal}$$

In fisica, l'energia si misura in joule. Tuttavia, in passato, quando si iniziò a studiare i fenomeni termici, il legame tra calore ed energia non era ancora noto. Per questo motivo, fu creata un'unità di misura specifica per il calore: la caloria. Oggi si preferisce in genere esprimere sempre l'energia in joule.

"Conversione (caloria – joule): $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$

Energia introdotta (E_{in})

L'energia introdotta nell'organismo è quella contenuta nei legami chimici dei nutrienti.

Il nostro corpo non "brucia" il cibo come farebbe un fuoco. Utilizza un processo molto più controllato e efficiente chiamato metabolismo, in particolare attraverso le reazioni di catabolismo.

Il processo chiave è la respirazione cellulare. Funziona così:

1. Rottura dei Legami: Attraverso una serie di reazioni chimiche complesse (come la glicolisi e il ciclo di Krebs), l'organismo smonta le molecole di cibo (es. glucosio) pezzo per pezzo, rompendo i loro legami chimici.
2. Rilascio di Energia: La rottura di questi legami ad alta energia rilascia l'energia che contenevano.
3. Cattura e Trasferimento: Questa energia non viene usata direttamente. Sarebbe inefficiente e dispersiva. Viene invece catturata e utilizzata per "caricare" una molecola speciale, la "moneta energetica" della cellula: l'ATP (Adenosina Trifosfato). L'energia viene usata per aggiungere un gruppo fosfato all'ADP (Adenosina Difosfato), trasformandolo in ATP.

I macronutrienti forniscono energia secondo questi valori, espressi sia in termini di calorie che di joule

Macronutriente	Energia (kcal/g)	Energia (kJ/g)
Carboidrati	4,0	16,7
Proteine	4,0	16,7
Grassi	9,0	37,7
Alcol	7,0	29,3

Il calcolo dell'apporto energetico totale si basa sulla composizione della dieta, spesso viene utilizzata la seguente formula empirica:

Energia totale = (grammi di carboidrati $\times$ 4) + (grammi di proteine $\times$ 4) + (grammi di grassi $\times$ 9) + (grammi di alcol $\times$ 7)

Per una dieta contenente ad esempio: 250g di carboidrati, 100 g di proteine, 80 g di grassi e 20g di alcol si ha

Energia totale = $(250 \times 4) + (100 \times 4) + (80 \times 9) + (20 \times 7) = 1000 + 400 + 720 + 140 = 2260 \text{ kcal}$

Ma non tutta l'energia contenuta negli alimenti è disponibile per il metabolismo:

Fattore	Perdita Energetica	%
Digestione incompleta	Feci	5-10%
Perdite urinarie	Urea, creatinina	2-3%
Fermentazione intestinale	Gas intestinali	1-2%

Quindi effettivamente l'energia metabolizzabile oscilla fra l'85- 92%

Il termine E_{in} , quindi (supponendo, come normalmente accade, che il calore e lavoro assorbiti siano del tutto trascurabili) si può calcolare in maniera approssimativa facendo il 90% dell'energia contenuta nei cibi che vengono assunti.

Metabolismo Basale (BMR)

Il metabolismo rappresenta l'insieme delle reazioni biochimiche che avvengono nell'organismo per mantenere la vita, esso è l'insieme di tutte le reazioni chimiche che avvengono nelle cellule di un organismo, e si divide in due processi principali: catabolismo e anabolismo. Il catabolismo è la fase di scomposizione delle molecole complesse in molecole più semplici, con rilascio di energia. L'anabolismo è il processo opposto, in cui l'energia viene utilizzata per costruire molecole complesse a partire da molecole più semplici.

Il metabolismo basale rappresenta la quantità minima di energia necessaria per mantenere le funzioni vitali in condizioni di riposo completo. Rappresenta circa il 60-70% del dispendio energetico totale in individui sedentari. Si misura da svegli, in posizione supina, a digiuno da almeno 12 ore, a riposo fisico e mentale, e in un ambiente con temperatura neutra (22 – 26°C).

Il tasso metabolico M, ossia la velocità con cui il corpo utilizza l'energia introdotta, che si misura in watt (energia/tempo), non può essere misurato facilmente, esso viene determinato principalmente tramite la calorimetria indiretta, che si basa sul principio che tutto il metabolismo energetico dipende dal consumo di ossigeno (O_2) e dalla produzione di anidride carbonica (CO_2).

La formula più utilizzata è l'equazione di Weir:

$$M \text{ (in kcal/min)} = 3.941 \cdot V_1(O_2) + 1.106 \cdot V_2(CO_2)$$

dove:

$V_1(O_2)$ è il volume di ossigeno consumato in litri al minuto (L/min).

$V_2(CO_2)$ è il volume di anidride carbonica prodotta in litri al minuto (L/min).

Considerando ad esempio un uomo adulto di 70 kg che sia a riposo (condizioni basali). I valori tipici di scambio gassoso sono:

$$V_1(O_2) \approx 0.25 \text{ L/min}$$

$$V_2(\text{CO}_2) \approx 0.21 \text{ L/min}$$

Applicando l'equazione di Weir si ha:

$$M = (3.941 \cdot 0.25) + (1.106 \cdot 0.21) = 0.985 + 0.232 = 1.217 \text{ kcal/min}$$

Poco più di una chilocaloria al minuto.

Per conoscere il valore giornaliero occorre moltiplicare per i minuti presenti in 24 ore, ossia 1440, avendosi

$$M = 1750 \text{ kcal/giorno}$$

Possiamo convertire in watt questo risultato, ricordando che la potenza è l'energia scambiata nell'unità di tempo (1 kcal = 4184 J, 1 min = 60 s), si ha:

$$M \approx 85 \text{ W}$$

Questo è l'ordine di grandezza della potenza sviluppata dal nostro corpo per il suo Metabolismo Basale. Ovviamente quando il corpo non è a riposo il suo valore aumenta.

Per una persona sveglia e seduta, a causa del tono muscolare e di piccole attività, il valore è leggermente più alto di quello basale:

$$M \approx 100 \text{ W}$$

Il metabolismo basale, in alternativa al metodo diretto, può essere stimato attraverso diverse formule empiriche. Una delle più utilizzate è la formula di Harris-Benedict (il cui risultato è il kcal):

$$\text{Per gli uomini: BMR} = 88,36 + (13,4 \cdot \text{peso}) + (4,8 \cdot \text{altezza}) - (5,7 \cdot \text{età})$$

$$\text{Per le donne: BMR} = 447,6 + (9,2 \cdot \text{peso}) + (3,1 \cdot \text{altezza}) - (4,3 \cdot \text{età})$$

Esempio numerico:

Un uomo di 30 anni, 75 kg di peso e 180 cm di altezza:

$$\text{BMR} = 88,36 + (13,4 \cdot 75) + (4,8 \cdot 180) - (5,7 \cdot 30) = 88,36 + 1005 + 864 - 171 = 1786 \text{ kcal}$$

Il BMR è distribuito tra i diversi organi e tessuti:

Organo/Tessuto	Perc. del BMR	kcal/kg tessuto/giorno
Fegato	21%	200
Cervello	20%	240
Cuore	9%	440
Reni	8%	440
Muscolo scheletrico	22%	13
Tessuto adiposo	4%	4,5
Altri tessuti	16%	

Fattori che influenzano il Metabolismo Basale

Età

Il metabolismo basale diminuisce con l'età: $\Delta\text{BMR} = -1 \text{ a } -2\%$ per decade dopo i 30 anni

Sesso

Le differenze di genere nel metabolismo:

- Uomini: BMR mediamente 10-15% superiore
- Differenze nella composizione corporea
- Effetti ormonali (testosterone vs estrogeni)

Composizione Corporea

$$\text{BMR} = 21,6 \cdot \text{FFM (kg)} + 370$$

Dove FFM è la massa magra in kg.

Genetica

La variabilità genetica del metabolismo:

- Variazione inter-individuale: $\pm 200\text{-}300$ kcal/giorno
- Polimorfismi genetici influenzano:
 - Proteine disaccoppianti (UCP)
 - Recettori β -adrenergici
 - Ormoni tiroidei

Temperatura Ambientale

Zona di Termoneutralità: $22\text{-}27^\circ\text{C}$ (per un corpo vestito in modo leggero)

Al di fuori di questa zona:

- Freddo: $+10\text{-}15\%$ del BMR per ogni 10°C sotto 18°C
- Caldo: $+5\text{-}10\%$ del BMR per ogni 10°C sopra 25°C

Altitudine

Effetti dell'ipossia:

- Aumento del BMR del 5-10% sopra i 3000m
- Aumento della ventilazione
- Modifiche nella composizione corporea

Stato Nutrizionale

- Digiuno: $-20\text{-}30\%$ del BMR in 72 ore
- Restrizione calorica: $-15\text{-}20\%$ del BMR in 6 mesi

- Overfeeding: +10-15% del BMR

Fattori Patologici

Disturbi Tiroidei

- Ipertiroidismo: +20-30% del BMR
- Ipotiroidismo: -20-30% del BMR

Febbre

Aumento del BMR = 13% per ogni grado di febbre

Malattie Croniche

- Cancro: +10-20% del BMR
- Insufficienza cardiaca: +15-25% del BMR
- Malattie respiratorie: +10-15% del BMR

Effetto termico degli alimenti (TEF)

L'effetto termico del cibo (TEF, dall'inglese "Thermic Effect of Food") rappresenta l'energia che il corpo utilizza per digerire, assorbire, trasportare e metabolizzare i nutrienti contenuti negli alimenti. Questo processo avviene in seguito ai pasti ed è una componente fondamentale del dispendio energetico giornaliero.

Esso varia, ovviamente, in base alla composizione del pasto.

Nutriente	Percentuale dell'energia utilizzata per la digestione per tipo di nutriente
Proteine	20-30%
Carboidrati	5-10%
Grassi	0-3%
Alcol	10-15%

Ad esempio, se si assumono 100 kcal da proteine, circa 20-30 kcal saranno spese solo per digerirle e metabolizzarle. Questo rende gli alimenti ricchi in proteine leggermente più "costosi" da un punto di vista energetico.

Questo termine viene stimato intorno al 10 % dell'energia introdotta (E_{in}).

Attività fisica programmata (TEA)

Questo termine include tutte le attività fisiche strutturate e volontarie, come ad esempio fare attività sportiva.

Il dispendio energetico per attività fisica può essere calcolato usando il parametro MET (Metabolic Equivalent of Task), secondo la seguente formula empirica:

$$\text{Dispendio (kcal)} = [\text{MET} \cdot 3,5 \cdot \text{peso (kg)} / 200] \cdot \text{tempo (min)}$$

Attività	MET	Esempio
Riposo	1,0	Dormire
Leggero	1,5-3,0	Camminare lentamente
Moderato	3,0-6,0	Camminare velocemente
Vigoroso	6,0-9,0	Correre
Molto vigoroso	> 9,0	Correre velocemente

Esempio di calcolo del dispendio energetico dell'attività fisica volontaria.

Per un uomo di 75 kg che corre per 30 minuti a 10 km/h (MET = 9,8):

$$\text{Dispendio energetico (TEA)} = [9,8 \cdot 3,5 \cdot 75 / 200] \cdot 30 = 386 \text{ kcal}$$

Termogenesi non associata all'esercizio fisico (NEAT)

Questo parametro include tutte le attività non sportive, quali ad esempio il mantenimento della postura, fare lavori domestici, gesticolare mentre si parla, svolgere le attività lavorative a basso dispendio energetico.

Il NEAT può rappresentare dal 6% fino al 50% del dispendio energetico totale, a seconda dello stile di vita dell'individuo. Negli individui molto sedentari, il NEAT sarà minimo, mentre in soggetti con lavori fisicamente attivi o semplicemente più dinamici durante la giornata, può superare la TEA.

Esempio comparativo: due persone con lo stesso BMR e stessa alimentazione:

- Persona sedentaria (NEAT basso): dispendio giornaliero totale = 2200 kcal
- Persona attiva durante il lavoro (NEAT alto): dispendio giornaliero totale = 2700 kcal

Una differenza di 500 kcal al giorno può comportare un impatto significativo sul peso corporeo nel lungo termine (oltre 1 kg al mese).

Strategie per aumentare il NEAT: camminare mentre si parla al telefono, fare pause attive durante il lavoro sedentario, usare le scale invece dell'ascensore, fare brevi camminate dopo i pasti.

Il NEAT è quindi una leva molto efficace per migliorare il bilancio energetico senza necessariamente dedicare tempo a sessioni di allenamento strutturate.

Possiamo riassumere quanto detto finora osservando che il dispendio energetico totale giornaliero (TDEE) può essere suddiviso in quattro componenti principali (trascurando per ora la termoregolazione in quanto nel modello che stiamo utilizzando esso è inglobato nel metabolismo basale in quanto esso viene calcolato a temperatura ambiente "standard" (circa 22-25 °C), in condizioni neutre.

1. Metabolismo Basale (BMR) - 60-70%

Rappresenta l'energia necessaria per mantenere le funzioni vitali basilari:

- Respirazione cellulare
- Circolazione sanguigna
- Funzione renale
- Sintesi proteica
- Mantenimento del potenziale di membrana

2. Effetto Termico degli Alimenti (TEF) - 8-12%

L'energia spesa per la digestione, assorbimento e metabolismo degli alimenti:

3. Attività Fisica da Esercizio Fisico (TEA) - 15-30%

Include tutte le attività fisiche strutturate e volontarie (come ad esempio lo sport).

4. Attività (termogenesi) non da Esercizio Fisico (NEAT) - 15-50%

Attività lavorative a basso dispendio energetico, lavori domestici, ecc...

La seguente figura riassume in modo sintetico quanto detto, avendo inglobato nel riquadro attività fisica sia quella volontaria che involontaria.



Se invece vogliamo avere un quadro più dettagliato occorrerà dividere il riquadro attività fisica nel seguente modo.



Quando siamo in un ambiente a temperatura confortevole, e il corpo non è sotto stress, non c'è bisogno di attivare sudorazione, brividi, ecc. in quanto il flusso di calore che entra è pari a quello che esce. Il metabolismo basale è sufficiente a mantenere la temperatura costante senza sforzo, quindi in condizioni normali non si ha spesa energetica aggiuntiva per la termoregolazione (termogenesi adattiva), ma nel caso in cui ci sia scambio di calore, (situazione in cui fa troppo caldo o freddo) occorre considerarla, ecco come si modifica l'illustrazione precedente.



Metabolismo Totale (MT)

In modo grossolano, il dispendio energetico totale giornaliero può essere stimato moltiplicando il BMR per un fattore di attività F:

$$\text{Metabolismo Totale} = \text{BMR} \cdot F$$

Livello di Attività	F	Descrizione
Sedentario	1,2	Nessuna attività fisica
Leggermente attivo	1,375	Esercizio leggero 1-3 giorni/settimana
Moderatamente attivo	1,55	Esercizio moderato 3-5 giorni/settimana
Molto attivo	1,725	Esercizio intenso 6-7 giorni/settimana
Estremamente attivo	1,9	Esercizio molto intenso, lavoro fisico

In particolare per quanto riguarda il cervello possiamo chiederci quale sia il suo dispendio energetico. Il cervello rappresenta circa 2% del peso corporeo, ma consuma circa il 20% dell'energia totale a riposo, ossia del metabolismo basale.

In termini assoluti, consuma in media circa 300-400 kcal al giorno solo per funzionare "normalmente".

Il suo consumo energetico è continuo: anche quando dormiamo, il cervello resta attivo per funzioni come sogni, memoria, regolazione autonoma, ecc.

Ma pensare "intensamente" fa bruciare più calorie?

Sì, ma non quanto si potrebbe pensare. Anche durante attività mentali intense (esami, programmazione, scacchi, ecc.), l'aumento del consumo energetico è modesto rispetto ad attività fisiche. Alcuni studi mostrano che il consumo può aumentare di un 5-10%, quindi parliamo di qualche decina di kcal in più all'ora. Tuttavia, queste attività possono aumentare la sensazione di stanchezza mentale, anche senza un grosso dispendio calorico. In condizioni normali la "benzina" del cervello è il glucosio, mentre in caso di digiuno prolungato, entra in gioco anche l'utilizzo di corpi chetonici.

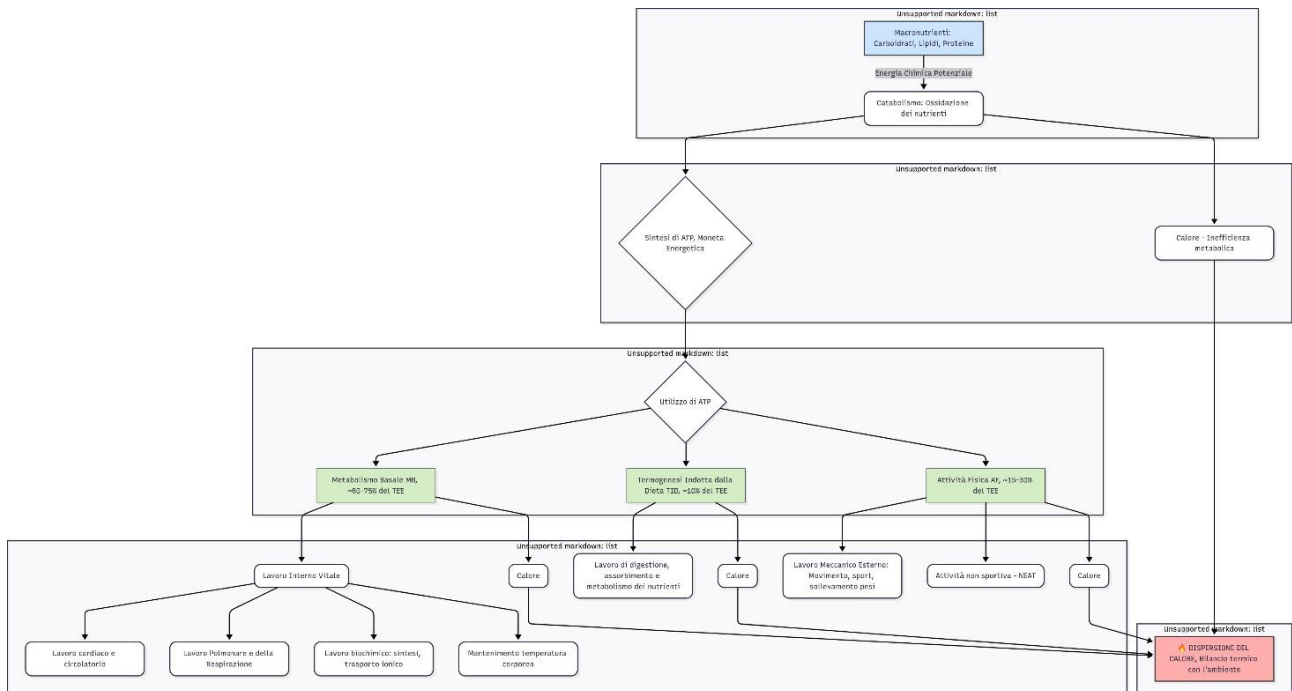
In sintesi

Stato cerebrale	Consumo energetico
Stato di veglia a riposo	~20% del metabolismo basale
Lavoro mentale intenso	+5-10% (modesto incremento)
Sonno	~15-20% meno che da svegli

Termoregolazione (Termogenesi adattiva)

Premessa

Prima di parlare della termoregolazione, è utile soffermarsi sulla seguente figura in cui viene illustrato il bilancio energetico del corpo umano, notando che il calore (riquadro colorato in basso a destra) si accumula come sottoprodotto di diversi processi: catabolismo, metabolismo basale, termogenesi degli alimenti e attività fisica.



Il primo passaggio del diagramma rappresenta l'ingresso dell'energia chimica nell'organismo umano, ed è indicato in alto nella casella blu:

(Carboidrati, Lipidi, Proteine, Alcol) → Energia chimica potenziale

Quando assumiamo cibo, introduciamo macronutrienti: carboidrati, grassi (lipidi), proteine e alcol. Questi nutrienti contengono energia chimica immagazzinata nei legami molecolari.

Energia chimica potenziale vuol dire che questa energia non è ancora utilizzata, ma è disponibile per essere trasformata in energia utilizzabile dal corpo, ad esempio sotto forma di ATP (adenosina trifosfato), la “moneta energetica” delle cellule. In breve: il corpo prende i macronutrienti, li “smonta” tramite reazioni, chimiche dette catabolismo, e ne ricava energia.

N. B. Il primo riquadro verde indicato come “Metabolismo” si intende il metabolismo in senso fisiologico, cioè l’insieme di processi energetici che servono a mantenere il corpo in vita, a riposo, in senso generale invece il metabolismo in senso generale viene definito come composto da due fasi: catabolismo (degradazione di molecole complesse) e anabolismo (costruzione di altre molecole complesse). Nella relazione (7) il termine metabolismo basale va inteso nella sua accezione generale di catabolismo e anabolismo.

Ad esempio, quasi tutte le reazioni metaboliche rilasciano calore:

La respirazione cellulare ($C_6H_{12}O_6 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + ATP + \text{calore}$)

Il ciclo di Krebs, la fosforilazione ossidativa, ecc.

Anche il semplice funzionamento degli organi interni (cuore, fegato, cervello) produce calore.

Anche digerire, assorbire e metabolizzare i nutrienti genera calore, in particolare:

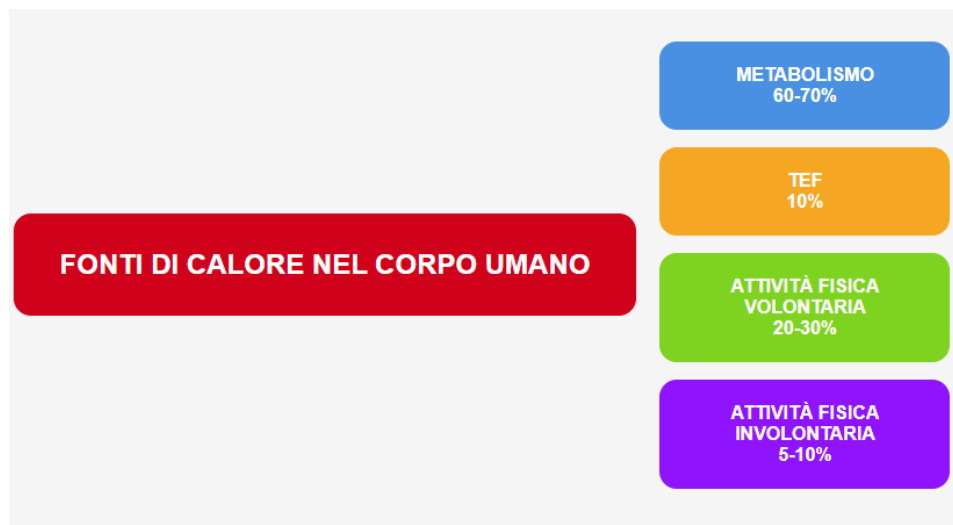
- Le proteine hanno il più alto TEF (fino al 30% dell'energia assunta!)
- I lipidi il più basso (~5-10%)

Nella relazione (7) che qui riportiamo

$$\Delta U = E_{in} - [L (20\% A) + Q (BMR + TEF + 80\% A)]$$

è specificato quali siano le fonti del calore che viene prodotto dal corpo umano, ossia metabolismo, digestione e attività fisica (in questa relazione il BMR è inteso nella sua accezione generale come catabolismo e anabolismo).

La seguente illustrazione riassume quanto detto (dove il termine metabolismo è nella sua accezione generale, invece del disegno di cui sopra veniva usato, come già detto, in senso più ristretto).



Scambio termico con l'ambiente (Q)

In condizioni ambientali normali, cioè a temperatura termoneutra (di solito tra i 22 e i 27 °C per un corpo vestito in modo leggero e in stato di riposo, invece di 28 – 30 °C per un corpo nudo), il contributo energetico della termoregolazione è praticamente nullo, ecco perché non lo abbiamo considerato quando abbiamo detto che il dispendio energetico totale è la somma di quattro contributi (BMR+TEF+TEA+NEAT).

La termoregolazione è quel processo sempre attivo che mantiene costante il valore della temperatura interna del corpo umano intorno ai 37 °C, mentre la nostra superficie esterna, la pelle, è circa 36 °C.

La termoregolazione è un meccanismo omeostatico controllato dall' ipotalamo, che agisce come un termostato biologico. Quando la situazione non è più termoneutra la temperatura del corpo può scendere oppure salire.

Quando la temperatura scende:

- Brividi
- Vasocostrizione periferica (mani, piedi) → meno dispersione di calore
- Piloerezione (la "pelle d'oca") → cerca di intrappolare uno strato d'aria isolante (efficace solo nei mammiferi pelosi... quindi meno utile per noi)
- A lungo termine: attivazione del grasso bruno

Quando la temperatura sale:

- Sudorazione → evaporazione dell'acqua rimuove calore (1 g di sudore evapora = ~0.58 kcal dissipate)
- Vasodilatazione periferica → aumenta la perdita di calore
- Riduzione della termogenesi

Il bilancio termico: una "lotta continua"

Ogni secondo il corpo bilancia produzione e perdita di calore:

- Produzione: metabolismo, termogenesi della dieta, attività muscolare.
- Perdita: irraggiamento, convezione, conduzione ed evaporazione.

La regolazione è finemente modulata: bastano variazioni di 0.5 °C per scatenare meccanismi compensatori.

La determinazione della potenza termica emessa dal corpo umano è un'applicazione affascinante della termodinamica e della fisiologia. Si basa sul Primo Principio della Termodinamica applicato a un sistema biologico. A tal uopo riprendiamo la relazione (3) $\Delta U = E_{in} + Q - L$ osservando che nell'ipotesi di stazionarietà $\Delta U = 0$ si ha $E_{in} = -(Q - L)$ ma il calore ceduto all'ambiente va preso con il segno negativo, quindi $E_{in} = Q + L$ o anche

$$Q = E_{in} - L \quad (8)$$

A parole: l'energia netta dispersa verso l'ambiente (Q) è data dalla differenza fra l'energia prodotta dal metabolismo E_{in} e l'energia (L) spesa verso l'esterno.

Se ora consideriamo la versione differenziale con il tempo si ha

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dE_{in}}{dt} - \frac{dL}{dt} \rightarrow \dot{Q} = M - P$$

Ed ogni termine sarà espresso non più in joule ma in watt, allora dQ/dt sarà la potenza termica, M sarà il tasso metabolico, ossia la velocità con cui il corpo converte l'energia chimica del cibo in energia utilizzabile e P sarà la potenza meccanica (energia/unità di tempo) che il corpo esercita sull'ambiente (sollevare un peso, camminare, scrivere, parlare, correre...). Al fine di calcolare Q occorrerà preliminarmente calcolare M e P .

Per quanto riguarda L diciamo innanzitutto che una persona a riposo, seduta o in piedi, il lavoro meccanico esterno è nullo: $L \approx 0$. Anche se i muscoli si contraggono per mantenere la postura, non stanno compiendo lavoro su un oggetto esterno (Lavoro = Forza · Spostamento). Tutta l'energia di queste contrazioni si degrada immediatamente in calore all'interno del corpo. Per una persona in attività, invece, L è la potenza meccanica misurabile.

Ipotizziamo uno scenario semplice da valutare pensando ad un ciclista su un ergometro (cyclette con misuratore di potenza) pedalando con una velocità costante, sviluppi una potenza, che sarà anch'essa costante, di 180 W, si avrà $P = 180$ W.

[Ci si potrebbe chiedere con quale velocità pedalare per sviluppare una potenza di 180 W, la risposta dipende da che tipo di ergometro stai usando, perché ogni macchina ha un suo profilo di resistenza, ad esempio: fissa (imposta una certa forza), proporzionale alla velocità (resistenza tipo frenatura magnetica o aria), oppure costante in potenza (le più moderne). La relazione da usare è quella che lega la potenza alla forza ed alla velocità

$$P = F v$$

Supponiamo un ergometro che abbia una forza resistente sui pedali di 150 N (circa 15 kg), quindi la velocità lineare con cui pedalare è $v = P/F = 180 / 150 = 1.2$ m/s

Ma forse è più utile calcolare le pedate al minuto, a tal fine supponendo che la cyclette abbia un raggio della corona di 17.5 cm (valore tipico), la sua circonferenza è $C = 2 \pi r = 1.10$ m, quindi in numero di pedate al secondo è, ricordando che $v = \text{spazio/tempo} = C/\text{tempo} = Cf$, si ha $f = v/C = 1.2/1.1 = 1.09$ giri/s, se li vogliamo convertire al più usuale ed utile giri al minuto (rpm) si ha

$$rpm = 1.09 \frac{60 \text{ giri}}{60 \text{ s}} = 1.09 \frac{60 \text{ giri}}{\text{min}} = 65.4 (\text{giri} / \text{min})$$

Cioè poco più di una pedalata al secondo.]

Al fine di valutare M bisogna considerare che durante una attività fisica esso aumenta. Ricordiamo che il suo valore basale che potremo indicare con M_0 è di circa 100 W, come abbiamo già visto nel paragrafo dedicato al metabolismo basale, allora l'aumento sarà $\Delta M = M - M_0$. Considerando che la "macchina" corpo umano ha una efficienza intorno al 20%, vuol dire che per compiere un lavoro utile con potenza di 180 W, come nel caso del ciclista, l'attività metabolica dovrà aumentare di 900 W!

$$\text{efficienza} \equiv \eta = \frac{P}{\Delta M}$$

$$\Delta M \equiv M - M_0 = \frac{P}{\eta} = \frac{180}{0.2} = 900W$$

$$M = 900 + M_0 = 900 + 100 = 1000W$$

Ora possiamo calcolare il calore da dissipare

$$dQ/dt = M - P = 1000 - 180 = 820 W$$

Questo risultato è impressionante: per produrre 180 Watt di potenza sui pedali, il corpo del ciclista deve dissipare 820 Watt di calore!

Questo spiega l'intensa sudorazione e il surriscaldamento durante l'attività fisica.

Possiamo riassumere in questo schemetto l'esempio visto sopra.

Scenario	Tasso Metabolico (M)	Lavoro meccanico (L)	Potenza termica dQ/dt
Persona a riposo	100	0	100
Ciclista (con pedalata leggera)	1000	180	820

Ecco alcuni valori approssimativi dei valori di potenza meccanica in varie attività.

Attività	Consumo (Watt)	Note
🛌 Dormire	~70 W	Metabolismo basale
📖 Seduti rilassati	~100 W	Lavoro da scrivania
🚶 Camminare (3-4 km/h)	~200 W	Passeggiata tranquilla
🚶 Camminare (5-6 km/h)	~300 W	Passo sostenuto
🚲 Pedalare (tranquillo)	~400-500 W	Bici da città, ritmo blando
🚲 Pedalare (intenso)	~800-1000 W	Ciclista allenato, ritmo forte
🏃 Correre (8-10 km/h)	~700-900 W	Corsa regolare
🏃 Correre (12-15 km/h)	~1000-1200 W	Corsa veloce
🏋 Sforzo fisico intenso	~1200-1500+ W	Lavoro fisico pesante, sport ad alta intensità

Conoscere la potenza termica del corpo umano è fondamentale in molti campi, ad esempio:

Progettazione di impianti di climatizzazione (HVAC): Gli ingegneri devono calcolare il "carico termico" di un ambiente. In un ufficio, un cinema o una palestra affollata, il calore emesso dalle persone è una componente significativa da considerare per dimensionare correttamente l'impianto di raffreddamento.

Architettura e bioedilizia: Per progettare edifici energeticamente efficienti che sfruttino o gestiscano il calore umano.

Abbigliamento tecnico: I tessuti sportivi sono progettati per massimizzare la dispersione del calore, soprattutto tramite evaporazione.

Occorrerà precisare che finora abbiamo usato un valore approssimativo del tasso metabolico a riposo indicandolo intorno ai 100 W, ma tale valore in effetti varia da 60 a 100W seconda di età, sesso, massa magra e superficie corporea.

Un valore medio per uomo è circa $80 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$.

Per le donne tale valore è inferiore: 50–70 W.

Come riportano le riviste McArdle, Katch & Katch – "Exercise Physiology" e NASA technical reports.

Il dato dei 100 W sono più un valore simbolico che reale è una stima comoda da ricordare (e usata spesso anche nei corsi di fisica come ordine di grandezza).

Considerando una potenza media giornaliera M di 70 W erogata in modo costante per 24 ore, si ottiene un'energia giornaliera:

$$E = P \cdot t = 70 \text{ W} \cdot 24 \text{ h} = 70 \text{ W} \cdot 86,400 \text{ s} = 6.048 \text{ MJ} = 1450 \text{ kcal}$$

$M = 1450 \text{ kcal/giorno} = 70 \text{ W}$

Questo valore è in linea con quello stimato con le formule empiriche che abbiamo usato nel paragrafo sul Metabolismo Basale.

Principi della Termoregolazione

Il corpo umano mantiene una temperatura interna costante di circa 37°C attraverso un equilibrio tra produzione e perdita di calore:

Bilancio Termico all'equilibrio: produzione di calore = uscita di calore

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

Dove:

M = produzione di calore

R = radiazione

C = convezione

D = conduzione

E = evaporazione

Produzione di Calore (M)

Termogenesi Metabolica

La produzione di calore deriva principalmente da:

- Metabolismo basale (60-70%)
- Attività muscolare (20-30%)
- Effetto termico degli alimenti (8-12%)

Termogenesi da Brivido

In condizioni di freddo, il brivido può aumentare la produzione di calore fino a 5 volte il valore basale:

Produzione di calore da brivido = BMR $\times$ 5

Perdita di Calore ($\pm R \pm C \pm D - E$)

Meccanismi di perdita e formule quantitative per il loro calcolo.

R: Radiazione (45-50%) $Q_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon A (T_{\text{pelle}}^4 - T_{\text{amb}}^4)$

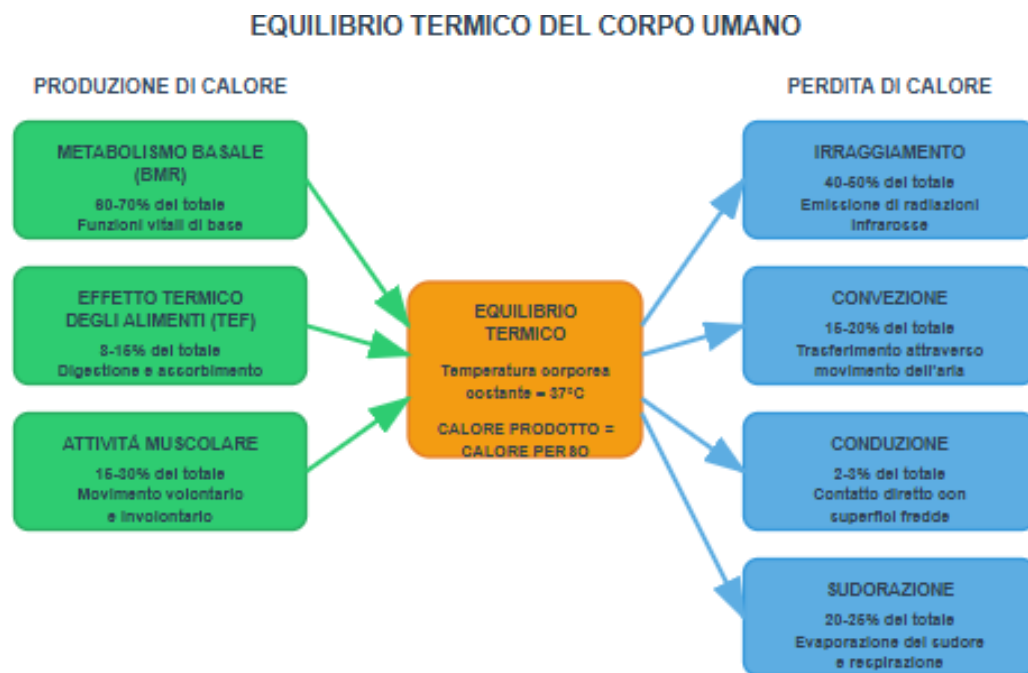
C: Convezione (30-35%) $Q_{\text{conv}} = h A (T_{\text{pelle}} - T_{\text{amb}})$

D: Conduzione (2-3%) $Q_{\text{cond}} = k A (T_{\text{pelle}} - T_{\text{superficie di contatto}}) / d$

E: Evaporazione (20-25%) $Q_{\text{evap}} = \lambda m_{\text{vapore}}$

Dove:

- σ = costante di Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
- ε = emissività della pelle ($\approx 0,95$)
- A = area superficiale corporea
- h = coefficiente di convezione
- k = conduttività termica
- d è lo spessore attraverso il quale avviene lo scambio termico, esso non è solo lo spessore della pelle, ma rappresenta lo spessore efficace dello strato isolante combinato di pelle e, soprattutto, di grasso sottocutaneo.
- λ = calore latente di vaporizzazione dell'acqua (2430 kJ/kg)



- **Irraggiamento (R)** - Ogni corpo per il solo fatto di essere ad una certa temperatura emette radiazione, detta termica, a temperature ordinarie essa è sostanzialmente radiazione infrarossa. Non ha bisogno di contatto. È la sensazione di calore che provate vicino a un caminetto acceso, anche se l'aria della stanza è fresca. O la sensazione di freddo vicino a una grande finestra in inverno, perché il vostro corpo "irradia" calore verso la superficie fredda del vetro.
- **Convezione (C)** - È il calore trasportato via dal movimento di un fluido (l'aria). Una leggera brezza in estate ci fa sentire subito meglio perché porta via lo strato d'aria calda a contatto con la nostra pelle.
- **Conduzione (D)** - È il calore disperso quando tocchiamo oggetti con temperatura diversa da quella corporea, si ricordi che la conduzione avviene quando due corpi solidi aventi differenza di temperatura vengono a contatto, pertanto si capisce che questo aspetto del trasferimento termico è del tutto marginale.
- **Evaporazione (E)** - quando il corpo si surriscalda (temperatura esterna alta e/o attività muscolare) il sistema di termoregolazione entra in azione facendo produrre sudore dalle ghiandole sudoripare. Il sudore è principalmente acqua con un po' di sali minerali. Il sudore evaporando dalla pelle sottrae calore al corpo.

Irraggiamento

Si tratta, come già osservato, dell'emissione di radiazione elettromagnetica da parte di un corpo dovuta alla sua temperatura. Qualunque corpo con temperatura > 0 K irradia energia sotto forma di onde elettromagnetiche (in particolare infrarosse per il corpo umano).

L'irraggiamento è un processo a due vie. Il nostro corpo irradia calore verso l'ambiente, ma allo stesso tempo assorbe il calore irradiato dagli oggetti circostanti (muri, mobili, ecc.). La perdita netta di calore è quindi determinata dalla differenza tra l'energia emessa dal corpo e quella assorbita dall'ambiente. Se ci troviamo in una stanza fredda, la perdita di calore per irraggiamento sarà maggiore rispetto a quando siamo in una stanza calda.

La temperatura del corpo in condizioni in cui la temperatura non superi i $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ circa irradia energia verso l'ambiente, nel contempo riceve anche energia dall'ambiente in quanto anch'esso per il fatto di essere ad una certa temperatura emetterà radiazione termica. La quantità di calore netta emessa per irraggiamento dipende allora sia dalla temperatura corporea che da quella ambientale, la formula che descrive questo comportamento è la seguente (legge di Stefan-Boltzmann)

$$P_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon A_{\text{eff}} (T_{\text{pelle}}^4 - T_{\text{amb}}^4)$$

P è la potenza netta irradiata (W)

ε = emissività del corpo umano (~ 0.97 , quasi un corpo nero)

σ (costante di Stefan-Boltzmann) = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

A_{eff} = area radiante effettiva (non è la superficie corporea (circa 1.8 m^2 per un adulto medio) ma l'area del corpo che "vede" effettivamente l'ambiente circostante). Parti del corpo irradiano calore verso altre parti del corpo (es. l'interno delle braccia verso il torso) e questo non contribuisce alla perdita netta di calore. L'area radiante effettiva tiene conto solo delle superfici che hanno una "linea di vista" libera con l'ambiente esterno. Si stima questo valore a circa l'80% della superficie corporea, quindi il suo valore di riferimento è circa 1.35 m^2 .

T_{pelle} = temperatura del corpo (pelle) in kelvin

T_{amb} = temperatura media ponderata dell'ambiente in kelvin

Ad esempio se $T_{\text{pelle}} = 306 \text{ K} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{amb}} = 294 \text{ K} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_{\text{eff}} = 1.35 \text{ m}^2$

$P = 97.5 \text{ W}$

Se invece, ci riferiamo ad una stanza con temperatura di 25°C (298 K) la potenza irraggiata è

$P = 65 \text{ W}$

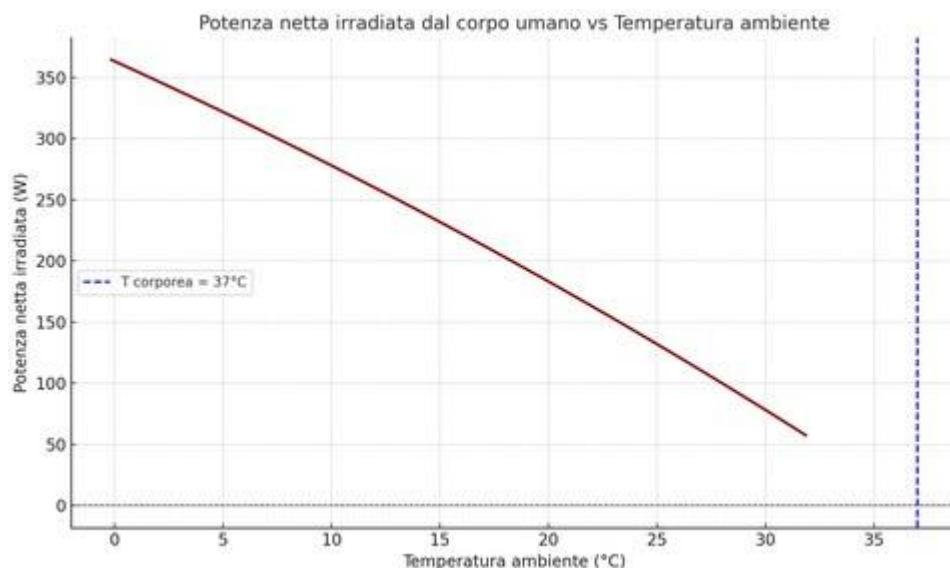
Come si può vedere, semplicemente aumentando la temperatura della stanza di $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, la potenza dissipata per irraggiamento crolla da 97.5 W a circa 65 W . Questo dimostra la sensibilità estrema della legge di Stefan-Boltzmann alla differenza di temperatura.

Si tenga presente che tale irraggiamento di calore vale per un corpo nudo. L'abbigliamento gioca un ruolo cruciale nel controllare la perdita di calore per irraggiamento. I vestiti non "producono" calore, ma agiscono come uno strato isolante che intrappola uno strato d'aria vicino alla pelle. Questo riduce la quantità di calore che può essere irradiata direttamente verso l'ambiente esterno.

Materiali diversi hanno proprietà radiative diverse. Ad esempio, una coperta di emergenza (la classica coperta isoterma color argento/oro) ha una superficie a bassa emissività che riflette il calore del corpo verso l'interno, riducendo drasticamente la perdita per irraggiamento.

Si osservi inoltre che la temperatura ambiente non coincide con la temperatura dell'aria: se all'interno di una stanza ci sono delle superfici che presentano una temperatura molto più alta di quella dell'aria (si pensi alla fiamma di un caminetto), la temperatura ambientale sarà una media nella quale la presenza di questa zona molto calda incide significativamente.

Nelle case italiane invece, dove ormai non esistono più camini o stufe, generalmente la temperatura media radiante coincide con la temperatura dell'aria, o addirittura risulta inferiore.



Si vede che più l'ambiente è freddo, più il corpo irradia energia (fino a oltre 300 W a 0 °C). Man mano che la temperatura ambiente si avvicina ai 37 °C, la radiazione netta tende a zero: il corpo non riesce più a disperdere calore per irraggiamento. A temperature sopra i 37 °C, la curva diventerebbe negativa (il corpo assorbirebbe calore dall'ambiente).

Osservazione

Nel caso della temperatura ambiente di 21 °C abbiamo visto che si ha $P = 97.5$ W, ma sappiamo che il metabolismo basale è intorno ai 80 W, inoltre considerando che si ha anche perdita di calore per conduzione ed evaporazione il suo valore è maggiore, diciamo intorno ai 120 W, allora come è possibile che l'uscita sia maggiore dell'entrata? La risposta è che il valore di 80 W si riferisce alle condizioni di metabolismo basale, quindi per una temperatura, per un corpo nudo, di 28-30°C, se invece il corpo è vestito in modo leggero la temperatura "comfort" è sui 22 °C.. Una stanza a 21 °C è un ambiente freddo per un corpo nudo. In queste condizioni, il corpo non può rimanere al suo metabolismo basale. Per evitare che la temperatura interna scenda, il sistema nervoso attiva la

termogenesi, cioè aumenta la produzione di calore attraverso la vasocostrizione e le contrazioni muscolari involontarie (brividi).

La vasocostrizione riduce il flusso di sangue alla pelle, questo abbassa la temperatura della pelle (T_{pelle}), riducendo la differenza ($T_{\text{pelle}}^4 - T_{\text{amb}}^4$) e quindi limitando la perdita per irraggiamento.

Termogenesi non da brivido: Il metabolismo dei tessuti, in particolare del tessuto adiposo bruno, viene accelerato per produrre più calore.

Termogenesi da brivido: Se la prima non basta, iniziano le contrazioni muscolari involontarie (brividi), che generano una quantità significativa di calore.

In conclusione: il corpo non emette più di quanto produce. Semplicemente, quando la perdita di calore è alta (come a 21°C per un corpo nudo), il corpo aumenta la sua produzione di calore ben al di sopra del livello basale per compensare perfettamente questa perdita.

E se la temperatura esterna è maggiore di quella della pelle?

Analizziamo il caso con una temperatura ambiente di 40 °C.

Temperatura Ambiente (T_{amb}): 40 °C

Temperatura Corporea T_{interna} : 37 °C

Temperatura della Pelle (T_{pelle}): 36°C

In condizioni di caldo, il corpo fa di tutto per raffreddarsi, quindi attua la vasodilatazione: aumenta al massimo il flusso di sangue verso la pelle per portare il calore dall'interno verso la superficie. La temperatura della pelle si avvicina molto a quella interna. Ipotizziamo una T_{pelle} di 36 °C (309.15 K).

Inserendo questi valori nella relazione mostrata sopra si ha

$$P_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon A_{\text{eff}} (T_{\text{pelle}}^4 - T_{\text{amb}}^4) = -36 \text{ W}$$

Cosa significa un valore negativo?

Significa che il flusso netto di calore è dall'ambiente verso il corpo. Invece di perdere calore per irraggiamento, il corpo umano sta assorbendo circa 36 Watt di calore radiante dalle pareti e dagli oggetti circostanti, che sono più caldi della sua pelle.

Analisi della Convezione (Q_{conv})

La convezione è la trasmissione di calore tramite il movimento di un fluido (in questo caso, l'aria). La sua direzione dipende dalla differenza di temperatura tra la pelle e l'aria.

Poiché la temperatura dell'aria (40 °C) è superiore a quella della pelle (36 °C), anche la convezione lavora contro di noi.

L'aria calda a contatto con la pelle le cede calore. Anche la convezione diventa un guadagno termico per il corpo. Il valore esatto dipende dalla velocità dell'aria, ma possiamo stimare un guadagno di circa 10-20 W.

A 40 °C, i due meccanismi principali di raffreddamento a riposo (irraggiamento e convezione) sono diventati inefficaci e, anzi, contribuiscono a riscaldare il corpo.

Come fa il corpo a sopravvivere?

La risposta è: l'evaporazione. Essa diventa in questa situazione l'unico meccanismo efficace di dissipazione del calore.

L'equazione del bilancio energetico diventa:

$$M - W + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{evap}} = 0$$

Dove:

M: Produzione di calore metabolico (ad esempio quello basale è circa 100 W).

W: Lavoro meccanico (lo poniamo a zero a riposo).

Q_{rad} : Guadagno di calore per irraggiamento (es. +36 W).

Q_{conv} : Guadagno di calore per convezione (es. +15 W).

Q_{evap} : Perdita di calore per evaporazione. Deve compensare tutto il resto.

Calcoliamo la perdita per evaporazione richiesta:

$$Q_{\text{evap}} = - (M + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{conv}})$$

$$Q_{\text{evap}} = - (100 \text{ W} + 36 \text{ W} + 15 \text{ W})$$

$$Q_{\text{evap}} = - 151 \text{ W}$$

Il corpo deve dissipare 151 W di potenza termica solo attraverso l'evaporazione (il segno meno indica una perdita).

Per sapere come quantificare questo processo vedi Nota 1 del paragrafo “Evaporazione”.

La nostra armatura segreta: l'abbigliamento

L'abbigliamento è la nostra principale arma per controllare lo scambio termico. La sua capacità di isolamento si misura in "clo".

1 clo = L'isolamento fornito da un tipico abito da uomo (pantaloni, camicia, giacca, cravatta).

0 clo = Corpo nudo (nessuna resistenza termica).

0,5 clo = Abbigliamento estivo leggero.

4 clo = Abbigliamento polare pesante.

I vestiti non solo isolano, ma aumentano anche la superficie che scambia calore con l'ambiente (FCL). Un cappotto ampio ha una superficie esterna maggiore del nostro corpo.

Quando calcoliamo lo scambio di calore per irraggiamento di una persona vestita, non usiamo la temperatura della pelle, ma la temperatura superficiale esterna dei vestiti, che è ovviamente più bassa.

Convezione

La convezione è uno dei principali meccanismi con cui il corpo umano scambia calore con l'ambiente, insieme a conduzione, irraggiamento ed evaporazione. Si tratta di un processo in cui il calore viene trasferito grazie al movimento di un fluido (aria o acqua) a contatto con la pelle.

A differenza della conduzione, che avviene per contatto diretto con una superficie statica, la convezione implica il trasferimento di calore tramite il movimento di un fluido, come l'aria o l'acqua. Questo processo gioca un ruolo fondamentale nella nostra termoregolazione quotidiana, influenzando la nostra sensazione di caldo e freddo in modi talvolta sorprendenti.

Principio fisico della convezione

La convezione si basa su un principio fisico semplice: quando un fluido (aria o acqua) viene a contatto con una superficie più calda, come la nostra pelle, ne assorbe il calore. Riscaldandosi, questo fluido si espande, diventa meno denso e tende a salire, venendo rimpiazzato da fluido più freddo e denso che a sua volta si riscalda. Questo ciclo continuo, chiamato moto convettivo, crea una corrente che allontana efficacemente il calore dalla superficie del corpo. Si stima che, in condizioni di riposo, la convezione sia responsabile di circa il 10-15% della perdita totale di calore del corpo.

Esistono due tipi principali di convezione:

- **Convezione Naturale:** avviene spontaneamente. L'aria a contatto con la nostra pelle si riscalda, diventa più leggera e sale, sostituita da aria più fresca. È un processo costante ma relativamente lento.
- **Convezione Forzata:** si verifica quando il movimento del fluido è accelerato da una forza esterna, come il vento generato da un ventilatore o le correnti naturali. Questo tipo di convezione aumenta drasticamente la velocità di scambio termico.

Il nostro corpo è quasi sempre circondato da un sottile strato di aria che, riscaldato dalla pelle, funge da isolante, rallentando la perdita di calore. La convezione, specialmente quella forzata, "strappa via" questa bolla d'aria isolante, sostituendola continuamente con aria più fredda. Questo è il motivo per cui una leggera brezza in una giornata calda può dare una piacevole sensazione di fresco: non abbassa la temperatura dell'aria, ma accelera la rimozione del calore dal nostro corpo.

Il sistema circolatorio, come per la conduzione, è un attore chiave. In risposta al caldo, la vasodilatazione porta più sangue caldo in superficie, aumentando la temperatura della pelle e massimizzando così la perdita di calore per convezione. Al contrario, con il freddo, la vasocostrizione riduce il flusso di sangue alla pelle, abbassandone la temperatura e conservando il calore interno.

L'impatto della convezione sulla nostra vita è evidente in molte situazioni quotidiane e ha implicazioni dirette per il nostro comfort, la nostra salute e le nostre prestazioni.

L'Effetto Vento (Wind Chill)

Il vento è l'esempio più comune di convezione forzata. L'effetto "wind chill" descrive come la nostra percezione della temperatura sia più bassa di quella reale a causa dell'azione del vento. Un vento freddo e secco può aumentare il rischio di irritazioni cutanee e problemi alle vie respiratorie. In casi estremi, può accelerare pericolosamente la perdita di calore, portando all'ipotermia.

L'Immersione in Acqua

L'acqua è un conduttore di calore molto più efficiente dell'aria. Quando siamo immersi, il calore viene trasferito dal nostro corpo all'acqua non solo per conduzione, ma anche e soprattutto per convezione, a causa dei movimenti del fluido. Questo spiega perché si avverte freddo molto più rapidamente in acqua a 25°C che in aria alla stessa temperatura. La perdita di calore per convezione in acqua può essere fino a 25 volte superiore a quella in aria calma alla stessa temperatura, rendendo l'immersione in acque fredde particolarmente pericolosa.

Il Ruolo dell'Abbigliamento

Gli indumenti agiscono come una barriera contro la convezione. Intrappolano uno strato d'aria tra il tessuto e la pelle, impedendone il movimento. Quest'aria ferma si riscalda e funge da isolante, riducendo drasticamente la quantità di calore persa. I vestiti a più strati sono particolarmente efficaci perché creano molteplici strati d'aria intrappolata. I materiali antivento sono progettati specificamente per bloccare la convezione forzata, mantenendo intatto lo strato d'aria isolante vicino al corpo.

Convezione e Salute

Sebbene spesso associata al raffreddamento, la convezione ha anche aspetti benefici. Una brezza leggera può migliorare la qualità dell'aria che respiriamo, disperdendo inquinanti e allergeni. Tuttavia, correnti d'aria costanti, soprattutto se fredde o umide, possono avere effetti negativi. Alcune persone, definite "meteoropatiche", sono particolarmente sensibili al vento, che può scatenare mal di testa, nervosismo, dolori muscolari e persino un aumento della pressione sanguigna.

In sintesi, la convezione è un potente meccanismo di scambio termico, un "vento" che può rinfrescare o raffreddare, a seconda della sua intensità e della temperatura del fluido circostante. Il nostro corpo, attraverso la regolazione del flusso sanguigno cutaneo, e noi, attraverso la scelta dell'abbigliamento, mettiamo in atto continue strategie per gestire questo dialogo con l'ambiente, cercando di mantenere l'equilibrio termico necessario per il nostro benessere.

La relazione che quantifica tale effetto è la Legge del raffreddamento di Newton:

$$\frac{Q}{t} = h A (T_{\text{pelle}} - T_{\text{fluido}})$$

dove:

$\frac{Q}{t}$ = flusso di calore (W)

h = coefficiente di scambio termico (W/(m² · K)), dipende da velocità e tipo di fluido

A = area di pelle esposta (m²)

T_{pelle} e T_{fluido} = temperature in °C

In aria: il coefficiente h è basso ($\sim 2\text{--}25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) e cresce molto con la velocità del vento.

In acqua: il coefficiente h è molto più alto ($\sim 100\text{--}600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) → raffreddamento molto più rapido, anche senza movimento.

L'acqua sottrae calore ~ 25 volte più velocemente dell'aria alla stessa temperatura.

Esempio numerico

Temperatura pelle = 34°C

Temperatura aria = 20°C ($\Delta T = 14 \text{ K}$)

Area esposta $A = 0.8 \text{ m}^2$ (gran parte del corpo)

Coefficiente $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (aria in leggera brezza)

$$\frac{Q}{t} = 10 \times 0.8 \times 14 = 112 \text{ W}$$

Significa $\sim 112 \text{ J/s}$ persi per convezione → circa 96.4 kcal/ora .

Se il vento aumenta e h passa a 25:

$$\frac{Q}{t} = 25 \times 0.8 \times 14 = 280 \text{ W}$$

→ $\sim 241 \text{ kcal/ora}$: quasi 2,5 maggiore in questo caso.

Ruolo fisiologico

Il corpo può modulare la perdita per convezione:

Vasodilatazione cutanea: più sangue caldo arriva alla pelle → più calore ceduto all'aria o all'acqua.

Vasocostrizione cutanea: riduce il flusso sanguigno superficiale per trattenere calore.

Peli eretti (piloerezione): negli animali, intrappolano uno strato d'aria riducendo la convezione naturale (negli umani l'effetto è minimo).

Comportamenti: vestirsi a strati, cercare riparo dal vento, o viceversa esporsi ad aria in movimento per raffreddarsi.

Convezione vs conduzione

Conduzione: richiede contatto diretto e scambio molecolare (importante solo se il fluido è fermo).

Convezione: richiede movimento del fluido, ed è molto più efficace quando il fluido ha alta velocità o alta capacità termica (es. acqua).

In aria ferma, la perdita per convezione naturale è simile alla conduzione; con vento o movimento in acqua, domina nettamente.

Importanza clinica e sportiva

In sport acquatici (nuoto, immersione) il raffreddamento per convezione in acqua può portare rapidamente a ipotermia, anche in acque temperate.

In montagna, la combinazione di freddo e vento (wind chill) aumenta drasticamente la perdita di calore e il rischio di assideramento.

In ambienti caldi, ventilatori o vento accelerano la dispersione di calore (a patto che la temperatura dell'aria sia inferiore a quella della pelle).

Conduzione

La conduzione è il trasferimento di calore attraverso il contatto diretto tra corpi o materiali con diversa temperatura. L'energia si propaga per vibrazione molecolare e trasferimento microscopico di energia cinetica, senza movimento macroscopico di materia.

Legge di Fourier della conduzione:

$$\frac{Q}{t} = k A \frac{\Delta T}{d}$$

dove:

$\frac{Q}{t}$ = flusso di calore (W)

k = conducibilità termica del materiale (W/(m · K))

A = area di contatto (m²)

ΔT = differenza di temperatura tra le superfici (K o °C)

d = spessore dello strato conduttore (m)

A livello microscopico, l'energia termica si manifesta come l'oscillazione delle molecole di un materiale.[1] Quando una parte del corpo più calda entra in contatto con una più fredda, le molecole che vibrano più velocemente (più calde) urtano quelle vicine più lente (più fredde), trasferendo loro energia. Questo processo a catena continua fino a quando non si raggiunge un equilibrio termico. È importante notare che nella conduzione non c'è un trasporto di materia, ma solo di energia.

Conduzione nel corpo umano

Nel corpo umano, la conduzione può avvenire in due contesti principali:

All'interno del corpo

Il calore prodotto nei muscoli e negli organi si propaga verso la pelle attraverso tessuti biologici (muscoli, grasso, pelle).

La conducibilità termica dei tessuti è relativamente bassa:

Acqua/tessuto muscolare: $k \approx 0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Tessuto adiposo: $k \approx 0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (ottimo isolante)

Lo strato adiposo funziona quindi come una “coperta naturale” riducendo la perdita di calore.

Tra corpo e ambiente

Quando il corpo tocca una superficie (terra, metallo, acqua ferma), il calore fluisce per conduzione.

L'effetto è più marcato se il materiale a contatto ha alta conducibilità termica:

Metalli $\rightarrow$ alto $k \rightarrow$ raffreddamento rapido

Legno o tessuti $\rightarrow$ basso $k \rightarrow$ raffreddamento lento

L'acqua, pur non essendo conduttrice come i metalli, ha k e calore specifico elevati $\rightarrow$ grande capacità di sottrarre calore.

Nel corpo umano, la conduzione gioca un ruolo duplice: può essere un meccanismo di perdita di calore o di acquisizione di calore. Se tocchiamo un oggetto più freddo della nostra pelle, come una lastra di metallo o un bicchiere di acqua ghiacciata, il calore fluisce dal nostro corpo verso l'oggetto, provocando una sensazione di freddo. Al contrario, se entriamo in contatto con una superficie più calda, il calore si trasferisce a noi. Sebbene a riposo rappresenti solo una piccola percentuale della dispersione totale di calore (circa il 2-3%), il suo impatto può diventare significativo in determinate situazioni, come quando si è immersi in acqua, che conduce il calore circa 20 volte più efficacemente dell'aria.

Esempio numerico

Supponiamo di poggiare la mano (area $A = 0.015 \text{ m}^2$) su una lastra metallica a 10°C . Temperatura pelle = 33°C , spessore pelle $d \approx 2 \text{ mm} = 0.002 \text{ m}$. Conducibilità pelle $k \approx 0.37 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Applicando Fourier:

$$\frac{Q}{t} = 0.37 \times 0.015 \times \frac{(33 - 10)}{0.002}$$
$$\frac{Q}{t} \approx 42.6 \text{ W}$$

Quindi in questa condizione si trasferiscono $\sim 42 \text{ J}$ ogni secondo dalla mano al metallo. In pochi secondi, la mano percepisce un forte raffreddamento.

Esempi Pratici di Conduzione Termica

Vestiario: Gli abiti non "producono" calore, ma agiscono come isolanti. Intrappolano uno strato d'aria vicino alla pelle. Poiché l'aria ferma è un cattivo conduttore di calore, questo strato rallenta notevolmente la dispersione di calore dal corpo per conduzione e convezione. Il potere isolante di un indumento dipende dal tipo di tessuto e dal suo spessore.

Sensazione Termica: Perché una maniglia di metallo a 20°C sembra molto più fredda di un libro alla stessa temperatura? La risposta risiede nella diversa conducibilità termica.[5] Il metallo è un eccellente conduttore e sottrae calore dalla nostra mano molto più rapidamente del legno o della carta, che sono isolanti. La nostra percezione non misura la temperatura dell'oggetto, ma la velocità con cui scambia calore con la nostra pelle.

Attività Fisica: Durante l'esercizio, l'attività muscolare genera una grande quantità di calore. Il corpo risponde con una vasodilatazione massiccia per trasportare questo calore in eccesso alla pelle, da cui può essere dissipato, anche per conduzione se siamo a contatto con superfici più fredde.

Applicazioni Mediche: La conduzione termica è sfruttata in diverse pratiche mediche. Impacchi caldi o freddi vengono utilizzati per alleviare il dolore muscolare o ridurre il gonfiore, trasferendo calore da o verso l'area interessata per conduzione. In procedure più complesse come la termoablazione, temperature estreme vengono applicate direttamente ai tessuti (ad esempio, tumori) per distruggerli, utilizzando la conduzione per propagare l'effetto termico.

Fattori che influenzano la perdita di calore per conduzione

1. Differenza di temperatura (ΔT): maggiore differenza → maggiore flusso di calore.
2. Area di contatto: superfici più grandi → più perdita.
3. Spessore dello strato isolante (pelle, abiti): maggiore spessore → minore conduzione.
4. Conducibilità del materiale a contatto: metallo > acqua > legno > aria.
5. Durata del contatto: più tempo → più energia scambiata.

La conduzione, pur essendo meno dominante della convezione o evaporazione in condizioni di aria ferma e asciutta, diventa cruciale in contatto diretto con materiali ad alta conducibilità o in acqua fredda. La sua comprensione è essenziale per la medicina sportiva, la fisiologia ambientale e la prevenzione dell'ipotermia.

Evaporazione

Quando l'acqua del sudore evapora, cioè passa dallo stato liquido a quello di vapore, assorbe energia.. Questo è l'energia necessaria per spezzare i legami tra le molecole d'acqua e farlo passare allo stato gassoso.

Il calore viene sottratto dalla pelle → la pelle si raffredda → il sangue che scorre vicino alla superficie si raffredda → il corpo si raffredda.

La formula che rende conto del processo è $Q = m \cdot L$

Q è il calore perso per evaporazione ed m è la massa di acqua che evapora

L è il calore latente di evaporazione che per l'acqua vale $L = 2.43 \text{ MJ/kg}$ (per temperatura corporea di 37°C). Se convertiamo L in kcal, ricordando che $1 \text{ kcal} = 4184 \text{ J}$, si ha

$$L = \frac{2.43 \cdot 10^6 \text{ J / kg}}{4184 \text{ J / kcal}} = 584 \text{ kcal / kg} = 0.58 \text{ kcal / g}$$

Abbiamo così una relazione più comoda da usare

$$Q = 0.58 \cdot m(\text{g})$$

Esempio. Supponendo di aver perso 500 g di sudore durante una certa attività motoria, e che tutto il sudore sia effettivamente evaporato e quindi abbia contribuito al raffreddamento, si ha

$$Q = 0.58 \cdot 500 = 290 \text{ kcal}$$

La perdita di calore attraverso la sudorazione può essere molto elevata.

Valori tipici del rateo di sudorazione con il tempo:

- Riposo: 50-100 g/h
- Attività moderata: 500-1000 g/h
- Attività intensa: 2000-3000 g/h

Questo è uno schema che illustra il processo della sudorazione.



Una formula più accurata che tiene conto dell'effetto dell'umidità dell'aria è la seguente:

$$\frac{dQ}{dt} = h_e A (p_s - p_a)$$

Dove dQ/dt è il flusso termico (potenza dissipata) in watt

h_e è il coefficiente di trasferimento evaporativo (W/m^2Pa)

A è l'area della superficie cutanea

p_s è la pressione di vapore saturo dell'acqua alla temperatura della pelle

p_a è la pressione di vapore parziale dell'aria (dipende dall'umidità relativa)

Si vede che ad esempio quando p_a si avvicina a p_s la differenza si riduce e l'evaporazione sarà minore.

La temperatura della pelle (non del sudore in sé, ma della superficie cutanea sudata) è di solito intorno ai 34–35 °C. Alla temperatura di 35 °C, la pressione di vapore saturo dell'acqua è circa:

$$p_s = 5620 \text{ Pa}$$

Opportune tabelle, dette "tabelle psicrometriche", noto il grado di umidità dell'aria, consentono di ricavare la pressione parziale del vapore d'acqua, come ad esempio la seguente tabella.

Temp (°C)	p_s (Pa)	Umidità rel. ϕ	p_a (Pa)
20	2338	50%	1169
20	2338	80%	1870
25	3169	60%	1901
30	4240	40%	1696
30	4240	60%	2544
35	5620	40%	2248
35	5620	80%	4496

Il valore dell'area della superficie cutanea A , è grosso modo di 2 m² per una persona alta 1.80 m.

Rimane da valutare il parametro h_e , spesso viene usata la seguente relazione empirica

$$h_e = 16.5 \cdot h_c$$

dove h_c è il coefficiente di scambio termico convettivo che dipende dalla velocità dell'aria, una stima del suo valore può essere fatta usando la seguente relazione

$$h_c = 2.38 \cdot v^{0.25} \text{ dove } v \text{ è espresso in m/s.}$$

Esempi tipici:

Velocità aria v [m/s]	h_c [W/m ² ·K]
0,1	1,3
0,3	1,7
0,5	2,0
1,0	2,4
2,0	2,8

In condizioni normali indoor (poca aria in movimento), $v \approx 0,3$ m/s si ha $h_c \approx 28$ W/m² Pa

Esempio. Usando i valori di un ambiente indoor $v = 0.3$, $h_c = 1.7$, $h_e = 28$ W/m² Pa si ha

Flusso di calore disperso: $dQ/dt = 154$ W

Nel caso di una corsa a 10 km/h (2.78 m/s) la pelle “sente” un flusso di aria maggiore rispetto al caso sedentario, quindi aumenta h_c e di conseguenza h_e . Correndo con tale velocità il corpo genera una potenza sui 300 W. Ma a causa dell’inefficienza del corpo umano, solo il 20% circa della potenza prodotta dal metabolismo va in lavoro meccanico, il resto è calore da dissipare. E’ una situazione perfettamente analoga al caso del motore a scoppio delle nostre auto le quali hanno una efficienza esse pure intorno al 20%., in effetti possiamo dire che noi per spostarci utilizziamo delle stufe!

Il corpo quindi è costretto a regolare la sua temperatura aumentando il sudore — ma solo la parte che evapora effettivamente contribuisce al raffreddamento in quanto il sudore che gocciola è “sprecato” in termini di perdita di calore.

Abbiamo i seguenti dati:

$v = 3$ m/s (questa è la velocità relativa dell'aria sulla pelle dovuta al moto in assenza di vento)

Temperatura aria 30 °C

Umidità relativa 30%

Superficie corporea 2 m²

Temperatura della pelle 35 °C

P_s (35 °C) = 5620 Pa

$P_a = 0.50 P_s$ (35 °C) = 2120 Pa

$h_c = 2.38 \cdot v^{0.25} = 2.38 \cdot 3^{0.25} = 3.13$ W/m² Pa

$h_e = 16.5 \cdot h_c = 16.5 \cdot 3.13 = 51.6$ W/m² Pa

$$dQ/dt = h_e A (p_s - p_a) = 342 \text{ W} = 294 \text{ kcal/h}$$

Quanti grammi di sudore sono necessari per dissipare 294 kcal/h di calore che si disperde per evaporazione?

Sapendo che 1 grammo di sudore evaporato sottrae 0.58 kcal possiamo calcolare la massa occorrente:

$$\text{massa sudore}(g) = \frac{294}{0.58} = 507 (g / h)$$

Quindi durante una corsa a 10 km/h, in condizioni ambientali calde-umide, occorre far evaporare circa 0,5 L di sudore all'ora per mantenere la temperatura corporea.

Nota: la sudorazione reale è anche maggiore, perché non tutto il sudore evapora in quanto parte scivola via un valore realistico è di circa 1 L/h.

Fattori che influenzano h_e :

Fattore	Effetto su h_e
Velocità dell'aria	↑ velocità → ↑ h_e
Postura / movimento	Se ti muovi o cammini → ↑ h_e , quindi ↑ h_e
Abbigliamento	Copre la pelle → ↓ superficie efficace → ↓ effetto evaporativo
Sudorazione attiva	Aumenta l'effetto evaporativo potenziale, ma solo se il sudore può evaporare
Umidità alta	Non riduce h_e , ma riduce $\Delta p = p_s - p_a$ quindi riduce il flusso effettivo

Da notare che se l'aria ha una pressione parziale di vapore d'acqua uguale o superiore a quella del corpo non può avvenire scambio di tipo diffusivo attraverso la pelle né scambio di tipo evaporativo. In una situazione limite di condizione ambientale "caldo - umida" in cui la temperatura dell'aria sia uguale a 37°C e il grado igrometrico sia pari a 100% (la temperatura coincide di fatto con la temperatura del corpo umano e quindi le due pressioni si eguagliano), lo scambio evaporativo è nullo. Ciò non significa che il corpo umano non sudi. L'organismo infatti percepisce soltanto la sensazione di "caldo" o "freddo" e non può avere una giusta misurazione igrometrica: l'organismo suda, si copre di film liquido, ma esso non evapora e quindi non asporta calore dal corpo; il centro termoregolatore continua a percepire caldo vengono persi inutilmente litri di sudore, senza riuscire a raffreddare il corpo.

Concludiamo questa sezione facendo il confronto fra due situazioni esplicative del fenomeno.

Caso A: Deserto (Umidità 10%). L'aria è secca, quindi p_v è molto basso. La differenza ($p_s - p_a$) è grande. Il nostro sudore evapora istantaneamente, raffreddandoci in modo super efficiente. Ci sentiamo caldi, ma è sopportabile.

Caso B: Giungla (Umidità 95%). L'aria è quasi satura di vapore, quindi p_a è molto alto, quasi uguale a p_s . La differenza ($p_s - p_a$) è minima. Sudiamo a litri, ma il sudore non riesce a evaporare. Rimane sulla pelle, non sottrae calore e ci sentiamo oppressi, appiccicosi e spossati. L'afa è più pericolosa del caldo secco!

Nota 1.

Riprendendo l'esempio fatto al paragrafo "Irraggiamento", quantifichiamo il sudore necessario per smaltire un'attività fisica che sviluppa 151 W di potenza.

L'acqua (sudore) per passare dallo stato liquido a quello gassoso (vapore) assorbe una grande quantità di energia termica (in questo caso lo assorbe dalla pelle), chiamata calore latente di vaporizzazione, è ovvio che questo valore dipende dalla temperatura, infatti basti pensare che più ci si avvicina alla temperatura di ebollizione di una sostanza (a una certa pressione), minore sarà il calore latente richiesto per farla evaporare.

Per l'acqua a temperatura corporea, questo valore è di circa 2430 joule per grammo ($2.43 \cdot 10^6$ J/kg).

Per dissipare 151 W (che sono 151 J/s), di quanto sudore abbiamo bisogno?

$$\begin{aligned} Tassodi\ sudorazione(g / s) &= \frac{Potenza(J / s)}{Calorelatente)(J / g)} = \frac{151}{2430} = 0.062\ g / s = \\ &= 0.062 \frac{3600\ g}{3600\ s} = 0.062 \cdot 3600\ g / h = 223.2\ g / h \end{aligned}$$

Quindi, solo per stare fermo a 40 °C, il corpo deve produrre e far evaporare quasi un quarto di litro (250 g) di sudore ogni ora per mantenere stabile la sua temperatura interna. Se si aggiunge anche una minima attività fisica (che aumenta M), il tasso di sudorazione necessario aumenta drasticamente.

Concludendo questo esempio possiamo dire che con una temperatura esterna di 40 °C:

Irraggiamento e Convezione si invertono: Invece di raffreddare il corpo, lo riscaldano.

L'evaporazione è l'unico strumento di raffreddamento: Il corpo si affida interamente alla sudorazione.

L'umidità diventa critica: Se l'umidità dell'aria è alta, l'evaporazione del sudore è più difficile. Questo è il motivo per cui 40°C in un clima secco (es. deserto) sono più sopportabili di 35°C in un clima umido (es. foresta tropicale). Quando l'evaporazione fallisce, si va incontro al colpo di calore, ed in casi estremi alla morte.

La valvola di sicurezza del nostro corpo: il Termine di Accumulo

Il termine di accumulo è la nostra batteria termica. È la capacità del corpo di "assorbire" un eccesso di calore o di "cedere" energia dalle sue riserve quando fa freddo.

Questa batteria non è infinita. La sua capacità massima è di circa ± 600 kJ.

Scenario "Colpo di Freddo": Immaginate di perdervi in montagna di notte. La temperatura crolla. Il vostro corpo inizia a "spendere" l'energia accumulata per mantenere gli organi vitali caldi. Brucia le sue riserve (-600 kJ). Se questa energia si esaurisce, il corpo va in crisi: sospende la circolazione a mani e piedi (che diventano insensibili) e, nei casi estremi, si arriva all'ipotermia, alla necrosi dei tessuti e alla morte.

Scenario "Congestione": Vi tuffate in acqua gelida dopo aver preso il sole per ore. La nuca, dove si trova il nostro "termostato" (l'ipotalamo), subisce uno shock termico. Il termostato crede che tutto il corpo sia in ipotermia e lancia l'allarme: blocca la digestione, restringe i vasi sanguigni periferici e può causare uno shock. È un "falso allarme" del nostro sistema di sensori, con conseguenze potenzialmente gravi.

Il metabolismo è l'input primario del termine di accumulo. La capacità termica totale che l'organismo può sopportare, ovvero la massima dose di energia che l'organismo può temporaneamente mettere a disposizione in caso di freddo o di caldo è pari circa a ± 600 kJ. Il termine U costituisce la "valvola di sicurezza" del sistema nel momento in cui condizioni ambientali particolarmente severe non consentano all'organismo umano di far fronte alle esigenze energetiche con i mezzi usualmente utilizzati allo scopo. In condizioni transitorie il termine di accumulo diviene particolarmente importante e permette all'organismo umano di resistere a condizioni ambientali gravose. Scompensi dell'ordine di 600 kJ costituiscono i valori limite dell'elasticità energetica dell'organismo umano, al di là dei quali difficilmente la vita è in grado di riprendere il suo ritmo normale. Per una variazione in negativo maggiore di 600 kJ si verifica il cosiddetto "colpo di freddo", cioè si ha un significativo abbassamento della temperatura corporea, un grave deficit di energia, che l'organismo cerca di compensare attraverso la sospensione di alcuni servizi considerati non essenziali. Se un individuo si espone per pochi istanti a condizioni ambientali estremamente rigide, l'organismo non fa in tempo ad erogare la quota di energia che scatena questi meccanismi fisiologici (ad esempio il cosiddetto "blocco di digestione"), ma se la permanenza in queste condizioni sfavorevoli viene prolungata, l'organismo è costretto ad interrompere alcune funzioni come la circolazione sanguigna negli arti estremi, non considerati indispensabili per la sopravvivenza generale del corpo umano. Questi processi di raffreddamento estremo provocano conseguenze gravi (si verifica quel complesso di alterazioni strutturali irreversibili, detto necrosi, che ha per conseguenza la morte di cellule o di tessuti dell'organismo).

A causa della particolare posizione che il centro termoregolatore occupa all'interno del corpo umano, la percezione dell'organismo può essere facilmente ingannata: un improvviso raffreddamento della nuca, zona in cui risiede l'ipotalamo, può produrre l'erronea valutazione di un gravissimo raffreddamento del corpo, anche se l'organismo non è realmente in deficit di energia.

Questo fenomeno si verifica tipicamente quando un individuo si tuffa in una piscina gelata, dopo essere stato lungamente esposto al sole: il centro termoregolatore è improvvisamente raffreddato e immediatamente vengono sospese le attività digestive, la circolazione negli organi periferici (le mani ad esempio perdono sensibilità e la capacità di nuotare o attaccarsi agli appigli); addirittura si può verificare un blocco respiratorio o cardiaco.

Il corpo umano non è una macchina perfetta: come tutti i sistemi dotati di sensoristica è molto sensibile alle azioni dirette sui sensori, che possono facilmente portare a errori di valutazione. (Per impedire i casi di congestione sarebbe opportuno proteggere la nuca con un cappuccio di neoprene, in modo tale da difendere il centro termoregolatore da bruschi sbalzi di temperatura).

Esempi di Utilizzo dell'Accumulo

Situazione di freddo intenso:

Temperatura esterna: -20°C

Dispersione extra: $200 \text{ W/m}^2 \cdot 2 \text{ m}^2 = 400 \text{ W}$

Durata massima sopportabile: $t = \text{Energia}/\text{Potenza} = 600,000 \text{ J} / 400 \text{ W} \approx 25 \text{ minuti}$

Situazione di caldo intenso:

Temperatura esterna: 45°C , umidità 90%

Impossibilità di sudorazione efficace

Accumulo di calore: $150 \text{ W per } 1 \text{ ora} = 540 \text{ kJ}$ (vicino al limite!)

Durata massima sopportabile: $t \approx 1 \text{ ora}$

Conclusioni

● Irraggiamento

Domina a basse temperature: oltre **360 W a 0 °C**.

Decresce rapidamente con l'aumento della temperatura ambiente.

Si azzerava verso i **37 °C**.

● Convezione naturale

Proporzionale alla differenza $T_{\text{corpo}} - T_{\text{amb}}$.

Si aggira attorno ai **60–100 W** per temperature ambiente comuni.

Molto influenzata dal **movimento d'aria** (vento → convezione forzata).

● Conduzione

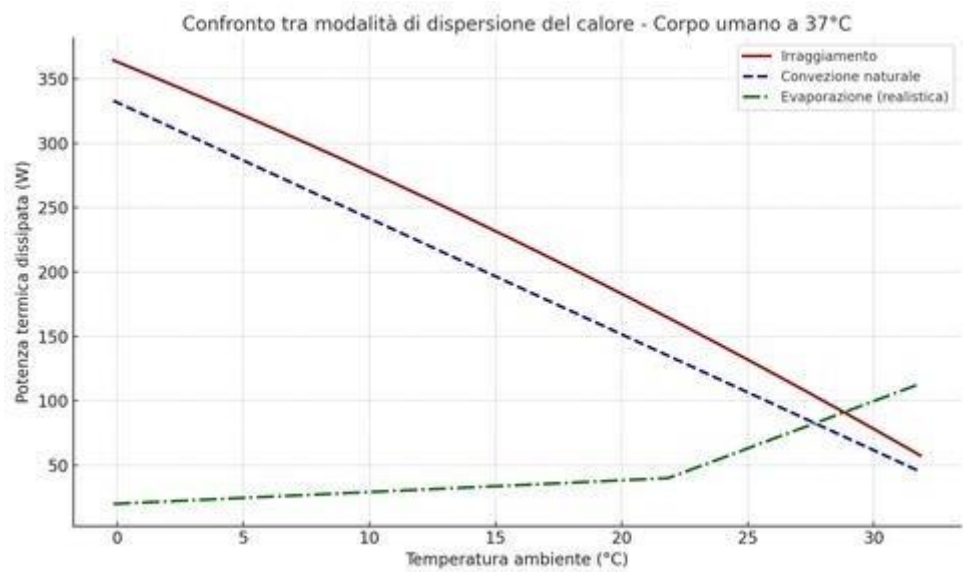
Trasferimento di calore per contatto diretto con superfici solide (es. acqua, terra, metallo, abbigliamento).

In aria, il contributo è in genere trascurabile (<5 W) a meno di contatti prolungati.

Può diventare molto rilevante in acqua fredda o su superfici ad alta conducibilità termica.

● Evaporazione (costante ~25 W)

- Presente anche a riposo, indipendente dalla temperatura ambiente (fino a ~35 °C).
- Diventa il principale meccanismo quando l'ambiente è caldo (oltre i 30 °C) in quanto gli altri meccanismi di dispersione non sono più sufficienti.
- Può arrivare a 60 W durante sudorazione intensa (esercizio fisico, caldo estremo).
- Nel seguente grafico mostrato l'andamento delle varie modalità di dispersione del calore, ad eccezione della conduzione in quanto trascurabile.



Variazione delle riserve energetiche (ΔS)

Riprendiamo la relazione (5)

$$\Delta S = E_{in} - E_{out}$$

Il termine (Δ) indica la variazione delle scorte (S) energetiche del corpo, principalmente sotto forma di:

- grasso corporeo
- glicogeno (*)
- massa muscolare (in certi casi, ad esempio in ipercatabolismo)

In pratica se $E_{in} > E_{out}$ allora ΔS è positivo e si ha un accumulo di riserve energetiche

se $E_{in} < E_{out}$ allora ΔS è negativo e si ha un consumo di riserve energetiche

se $E_{in} = E_{out}$ allora ΔS è nullo e la situazione è stabile.

$$\Delta S > 0$$

L'energia in eccesso viene immagazzinata sotto forma di massa (principalmente grasso, ma in certi casi anche glicogeno e un po' di massa muscolare).

Se il surplus è moderato e costante → aumento di peso nel tempo.

Se il surplus è elevato → accumulo più rapido di tessuto adiposo.

$$\Delta S < 0$$

Se invece l'energia richiesta supera quella fornita dagli alimenti il corpo deve compensare attingendo alle riserve interne:

Grasso corporeo → principale "banca energetica" (trigliceridi).

Glicogeno nei muscoli e nel fegato → usato nelle prime ore di deficit.

Proteine muscolari (in caso di deficit prolungato o molto marcato) → degradate in aminoacidi e convertite in energia via gluconeogenesi.

Effetti fisiologici principali:

Perdita di peso (prevalentemente massa grassa, ma anche massa magra se il deficit è grande o la dieta è sbilanciata).

Se il deficit è lieve e ben gestito → il corpo adatta il metabolismo senza grossi danni.

Se è forte e prolungato → calo del metabolismo basale, perdita muscolare, possibili carenze nutrizionali.

(*) Il glicogeno è un polisaccaride di riserva formato da tante molecole di glucosio collegate tra loro, conservato soprattutto:

- Nel fegato (~120 g in un adulto medio) → serve a mantenere la glicemia costante per tutto il corpo.
- Nei muscoli (~500 g totali) → usato localmente come carburante per la contrazione muscolare.

Cosa succede in deficit energetico

1. Prime ore di digiuno o deficit → il corpo consuma il glicogeno epatico per mantenere la glicemia.
2. Durante attività fisica → i muscoli usano il loro glicogeno per produrre ATP, specialmente in esercizi ad alta intensità.
3. Quando le scorte scendono molto, il corpo inizia a:
 - aumentare la mobilizzazione dei grassi (lipolisi);
 - attivare la gluconeogenesi (produzione di glucosio da aminoacidi, glicerolo, lattato).

Capacità energetica del glicogeno

1 g di glicogeno → ~4 kcal (circa 17 kJ)

Totale scorte corporee: 400–600 g → 1600–2400 kcal totali

Si esauriscono in circa 24 ore di digiuno o in poche ore di esercizio intenso.

Esempi numerici

Esempio 1) Calcolo del Metabolismo Basale (BMR) e totale (TDEE)

Soggetto: Donna, 30 anni, 65 kg, 170 cm, moderatamente attiva

Calcolo del BMR (Mifflin-St Jeor): $BMR = 10 \cdot \text{peso (kg)} + 6.25 \cdot \text{altezza (cm)} - 5 \cdot \text{età (anni)} - 161$

$BMR = (10 \cdot 65) + (6,25 \cdot 170) - (5 \cdot 30) - 161$
 $BMR = 650 + 1062,5 - 150 - 161 = 1401,5$
kcal/giorno

Calcolo del TDEE (metabolismo totale):

$TDEE = BMR \cdot F$ (dove F è il fattore di attività, come visto nel paragrafo sul metabolismo totale)

$TDEE = BMR \cdot 1,55 = 1401,5 \cdot 1,55 = 2172$ kcal/giorno

Distribuzione del dispendio:

BMR: 1400 kcal (64,5%)

TEF: 200 kcal (10%)

Attività: 550 kcal (25,5%)

Esempio 2) Pianificazione di una Dieta

Calcolare di quante kcal si deve ridurre una dieta per dimagrire 0,5 kg/settimana.

Siccome quando si crea un deficit alimentare la prima cosa che il corpo fa è attingere alle riserve energetiche di grasso, partiamo dal considerare che 1 kg di grasso corporeo equivale a circa 7.700 kcal, quindi per perdere 0,5 kg di grasso in una settimana è necessario creare un deficit totale di circa 3.850 kcal, cioè circa 500 kcal al giorno.

Nel caso di una dieta di partenza di 2170 kcal al giorno essa andrà portata a $2170 - 500 = 1670$ kcal, che potrebbe essere equilibrata nel seguente modo:

Proteine (25%): 100 g

Carboidrati (45%): 182 g

Grassi (30%): 54 g

Abbiamo descritto il caso in cui si volesse dimagrire puntando solo in una diminuzione di input calorico, se invece si volesse agire anche sul fronte di un aumento del dispendio energetico, si potrebbe programmare ad esempio

- una diminuzione di introito calorico di 250 kcal
- un aumento di dispendio di 250 kcal.

Attività fisica per “bruciare” 250 kcal

Camminata veloce (6 km/h) per 45 min

Ciclismo moderato (20 km/h) per 30 min

Nuoto moderato per 30 min

Fitness/Aerobica per 30 min

La restante quota di 250 kcal va scalata dall'apporto della dieta

Questa tabella permette di vedere a colpo d'occhio quante calorie contengono i cibi più comuni, permettendo così di agire sulla propria dieta per diminuirla dei 250 kcal del nostro esempio.

Tabella calorie per 100g di alimenti comuni

<i>Categoria</i>	<i>Alimento</i>	<i>Calorie (kcal)</i>	<i>Note</i>
<i>Carboidrati</i>	Pasta di semola	360	Peso a crudo
	Riso bianco	360	Peso a crudo
	Pane bianco	265	
	Patate	80	Peso a crudo
	Fette biscottate	410	
<i>Proteine</i>	Petto di pollo	110	Crudo, senza pelle
	Carne di manzo magra	140	Cruda
	Salmone fresco	200	Crudo
	Uova	155	Circa 2 uova grandi
	Tonno al naturale	115	Sgocciolato
<i>Latticini</i>	Latte intero	65	
	Yogurt greco 0% grassi	59	
	Parmigiano Reggiano	430	
	Mozzarella di vacca	280	
<i>Frutta</i>	Mela	52	
	Banana	89	
	Arancia	47	
	Fragole	32	
<i>Verdura</i>	Lattuga	15	
	Pomodori	18	
	Carote	41	
	Zucchine	17	
<i>Condimenti</i>	Olio evo	900	
	Burro	720	
<i>Frutta secca</i>	Mandorle	580	
	Noci	650	
	Pistacchi	560	
	Arachidi	600	
<i>Dolci e Snack</i>	Cioccolato fondente	550	
	Cioccolato al latte	535	
	Cornetto (vuoto)	450	
	Gelato alla crema	400	
	Miele	300	
	Zucchero (bianco/canna)	400	
<i>Bevande</i>	Vino rosso	85	
	Bibita zuccherata	40	

E' possibile — in linea teorica — creare un “deficit” di 500 kcal solo aumentando il dispendio energetico tramite attività fisica, senza modificare la dieta.

Camminata veloce (6 km/h) per 1.5 ore

Corsa (10 km/h) 45 min

Ciclismo moderato (20 km/h) per 1 ora

Nuoto moderato per 1 ora

Fitness/Aerobica per 1 ora

Perché “in linea teorica? Perché nella pratica, il corpo non è una calcolatrice perfetta:

Adattamenti metabolici: se si aumenta di tanto l'attività fisica, il metabolismo basale può ridursi leggermente per compensare.

Compensazione comportamentale: a volte, senza accorgersi, ci si muove di meno nel resto della giornata, ad es. dopo un allenamento impegnativo si passa più tempo stando seduti.

Fame eccessiva: l'esercizio intenso può aumentare l'appetito, e se mangi di più annulli il deficit.

Variabilità individuale: età, sesso, massa muscolare e livello di allenamento influenzano quante calorie bruci davvero.

Quindi “in linea teorica” funziona benissimo, ma nella realtà i risultati possono differire e serve un minimo di strategia per evitare che il corpo “recuperi” le energie spese con l'aumento dell'attività fisica.

N.B.

Abbiamo parlato quasi esclusivamente di grasso per un motivo fondamentale: in un percorso di dimagrimento sano e sostenibile, l'obiettivo primario è massimizzare la perdita di massa grassa e ridurre al minimo la perdita di massa magra (principalmente muscoli).

Quando si perde peso, non si perde solamente grasso. Il peso che si vede scendere sulla bilancia è una combinazione di:

Grasso (massa grassa): è il tessuto adiposo, la principale riserva di energia del corpo. Questo è ciò che si vuole ridurre per migliorare la salute e la composizione corporea. È molto denso di energia: 1 kg di tessuto adiposo contiene circa 7.700 kcal.

Acqua: Soprattutto nelle prime settimane di una dieta, una parte significativa del peso perso è costituita da liquidi. Questo accade perché il corpo utilizza le sue riserve di glicogeno (zuccheri immagazzinati nei muscoli e nel fegato). Ogni grammo di glicogeno è legato a circa 3-4 grammi di acqua. Quando il glicogeno viene consumato, l'acqua viene espulsa.

Massa Magra (incluso il muscolo): Questa è la componente che si vuole preservare a tutti i costi. Una perdita significativa di massa muscolare è controproducente perché:

Abbassa il metabolismo: i muscoli bruciano più calorie a riposo rispetto al grasso. Perderli rende più difficile continuare a dimagrire e più facile recuperare peso in futuro (il cosiddetto "effetto yo-yo").

Peggiora la forma fisica: Si perde tono, forza e funzionalità.

Il calcolo standard di "un deficit di 3.500 kcal per perdere 0,5 kg" si basa sull'energia contenuta prevalentemente nel tessuto grasso. Si usa come punto di riferimento perché:

È l'obiettivo desiderabile: la finalità della dieta è perdere grasso.

È un modello pratico: fornisce una stima semplice e funzionale per impostare un piano alimentare.

Promuove un approccio sano: Un deficit moderato di 500 kcal al giorno, abbinato a un'adeguata assunzione di proteine e a un po' di attività fisica, aiuta a indirizzare il corpo a bruciare le riserve di grasso piuttosto che a "cannibalizzare" i muscoli per ottenere energia.

Osservazione

- **Il Glicogeno è il "Portafoglio":** Contiene energia di pronto utilizzo, facilmente accessibile, ma in quantità limitata.
- **Il Grasso è il "Conto di Risparmio":** Contiene un'enorme riserva di energia, ma è più lento e complesso da prelevare.

Ecco cosa succede nel dettaglio quando inizi a ridurre le calorie.

Fase 1: Consumo del Glicogeno (Le prime ore / I primi giorni)

1. **Bisogno Immediato di Energia:** Appena crei un deficit calorico, il tuo corpo ha bisogno di energia per le sue funzioni base e per le tue attività. La prima fonte, la più rapida e comoda, è il glucosio che circola nel sangue.
2. **Accesso al "Portafoglio":** Esaurito il glucosio disponibile, il corpo si rivolge alle sue scorte di glicogeno immagazzinate nel fegato e nei muscoli. Le scompone rapidamente per rilasciare glucosio e produrre energia.
3. **La Perdita di Acqua:** Questo è un punto cruciale. Ogni grammo di glicogeno è legato a circa 3-4 grammi di acqua. Quando bruci glicogeno, liberi e elimini anche quest'acqua. **Questo è il motivo per cui nei primi giorni di dieta si assiste spesso a una perdita di peso molto rapida e significativa:** è in gran parte acqua, non ancora grasso.

Fase 2: Consumo del Grasso (Il dimagrimento reale e sostenibile)

1. **Le Scorte di Glicogeno si Riducono:** Le riserve di glicogeno non sono infinite. Dopo circa 24-48 ore di deficit calorico, pur non esaurendosi mai del tutto, si riducono a un livello tale che il corpo deve necessariamente attingere in modo più massiccio al suo "conto di risparmio".
2. **Attivazione della Lipolisi:** Il corpo inizia a scomporre i trigliceridi immagazzinati nelle cellule adipose (il nostro grasso corporeo) in acidi grassi. Questi acidi grassi vengono rilasciati nel sangue e trasportati ai muscoli e ad altri tessuti per essere usati come fonte di energia.
3. **Perdita di Grasso Reale:** Questo processo è più lento ma molto più potente, data l'enorme quantità di energia immagazzinata nel grasso. La perdita di peso diventa più lenta e graduale (come l'obiettivo di 0,5 kg a settimana), ma **ora stai perdendo prevalentemente massa grassa**, che è l'obiettivo finale.

Esempio 3) Calcolo del Dispendio per Attività

Attività: Corsa a 12 km/h per 45 minuti Soggetto: Uomo, 80 kg

Calcolo del dispendio:

MET per corsa a 12 km/h = 12,8 Dispendio/min = $12,8 \cdot 3,5 \cdot 80 / 200 = 17,92$ kcal/min

Dispendio totale = $17,92 \cdot 45 = 806$ kcal

Comparazione con altri macronutrienti:

- Equivale a 90 g di grassi
- Equivale a 201 g di carboidrati
- Equivale a 201 g di proteine

Esempio 4) Effetto del Clima sulla Termoregolazione

Condizioni: Temperatura 35°C, umidità 70%, attività moderata

Calcolo della perdita di calore per evaporazione:

Produzione di calore = 400 kcal/h = 465 W Efficienza sudorazione = $1 - 0,70 = 0,30$ Sudore necessario = $465 \text{ W} / (0,30 \times 680 \text{ W/L}) = 2,3 \text{ L/h}$

Fabbisogno idrico:

Fabbisogno totale = $2,3 \text{ L/h} + 0,5 \text{ L/h (perdite basali)} = 2,8 \text{ L/h}$

Conclusioni

Il bilancio energetico del corpo umano rappresenta un sistema complesso e dinamico governato da principi termodinamici fondamentali ma influenzato da numerosi fattori biologici, ambientali e comportamentali. La comprensione quantitativa di questi meccanismi è essenziale per applicazioni pratiche in ambito clinico, nutrizionale e sportivo.

L'analisi dei dati presentati evidenzia come il metabolismo basale rappresenti la componente principale del dispendio energetico totale, costituendo circa il 60-70% del fabbisogno calorico giornaliero in individui sedentari. Tuttavia, la variabilità inter-individuale è significativa e può raggiungere il 20-30%, rendendo necessario un approccio personalizzato nel calcolo del fabbisogno energetico.

Le equazioni predittive del metabolismo basale, sebbene utili nella pratica clinica, presentano limiti di accuratezza che possono essere significativi a livello individuale. L'equazione di Mifflin-St Jeor risulta generalmente più accurata rispetto a quella di Harris-Benedict, ma entrambe possono sottostimare o sovrastimare il metabolismo reale fino al 10-20%.

La termoregolazione rappresenta un aspetto cruciale del bilancio energetico, particolarmente in condizioni ambientali estreme o durante l'attività fisica intensa. La capacità di produrre e dissipare calore influenza significativamente il dispendio energetico e può richiedere adattamenti nutrizionali e idrici specifici.

La relazione tra bilancio energetico e peso corporeo, sebbene concettualmente semplice, è complicata dagli adattamenti metabolici che si verificano durante la perdita o l'aumento di peso. La classica regola delle 3500 kcal per kg di peso può essere imprecisa nel lungo termine a causa di questi adattamenti.

Gli esempi numerici presentati dimostrano l'importanza di un approccio quantitativo nella valutazione del bilancio energetico, fornendo strumenti pratici per la pianificazione nutrizionale e la gestione del peso corporeo. Tuttavia, è fondamentale considerare la variabilità individuale e monitorare costantemente la risposta del soggetto agli interventi implementati.

In conclusione, il bilancio energetico del corpo umano rimane un campo di ricerca attivo, con continue evoluzioni nella comprensione dei meccanismi molecolari e fisiologici coinvolti. L'integrazione di approcci quantitativi con tecnologie avanzate di monitoraggio prometterà ulteriori progressi nella personalizzazione degli interventi nutrizionali e nell'ottimizzazione della salute metabolica.

Prospettive Future

Le prospettive future nella ricerca sul bilancio energetico includono:

1. Personalizzazione genetica: Sviluppo di algoritmi che incorporino profili genetici per predire il metabolismo individuale
 2. Tecnologie wearable: Miglioramento dei dispositivi per il monitoraggio continuo del dispendio energetico
 3. Intelligenza artificiale: Applicazione di algoritmi di machine learning per ottimizzare la predizione del bilancio energetico
 4. Microbioma intestinale: Comprensione del ruolo del microbiota nella regolazione del metabolismo energetico.
-

Bibliografia Essenziale

1. Brooks GA, Fahey TD, Baldwin KM. Exercise Physiology: Human Bioenergetics and Its Applications. 4th ed. McGraw-Hill; 2005.
 2. Levine JA. Measurement of energy expenditure. Public Health Nutr. 2005;8(7A):1123-1132.
 3. Mifflin MD, St Jeor ST, Hill LA, et al. A new predictive equation for resting energy expenditure in healthy individuals. Am J Clin Nutr. 1990;51(2):241-247.
 4. Hall KD, Heymsfield SB, Kemnitz JW, et al. Energy balance and its components: implications for body weight regulation. Am J Clin Nutr. 2012;95(4):989-994.
 5. Rosenbaum M, Leibel RL. Adaptive thermogenesis in humans. Int J Obes. 2010;34 Suppl 1:S47-55.
-