

	Meccanismo	Equazione generale
Conduzione	Collisioni molecolari	$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$
Convezione	Diffusione molecolare	$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty)$
Radiazione	Fotoni	$\dot{Q} = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4)$
Evaporazione	Cambiamento di fase	$\dot{Q} = \dot{m}_w H$

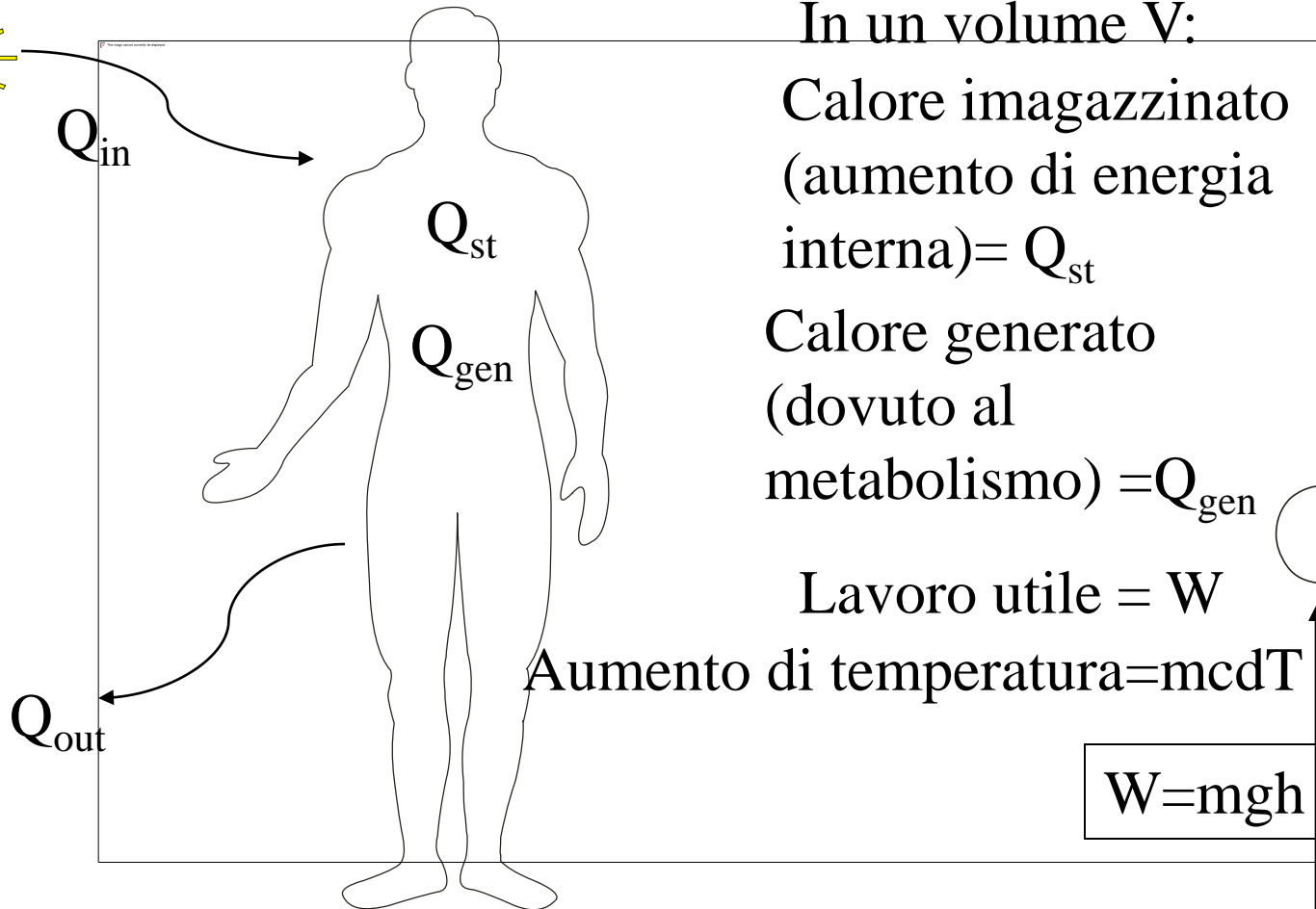
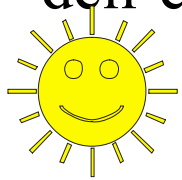
$Q \rightarrow$ Calore (Joule)

$\dot{Q} \rightarrow$ Calore prodotto nell'unita' di tempo (Joule s⁻¹ o Watt)

$\ddot{Q} \rightarrow$ Flusso di calore (Joule m⁻² s⁻¹)

$\dddot{Q} \rightarrow$ Flusso volumetrico (Joule m⁻³ s⁻¹)

Prima legge della termodinamica: Conservazione dell'energia



$$Q_{st} + Q_{in} + Q_{gen} = Q_{out} + W + mcdT$$

Consideriamo un sistema con $W=0$,
 $Q_{st}=0$. In questo caso

$$mcdT + Q_{st} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{gen} - W$$

$$mcdT = Q_{in} - Q_{out} + Q_{gen}$$

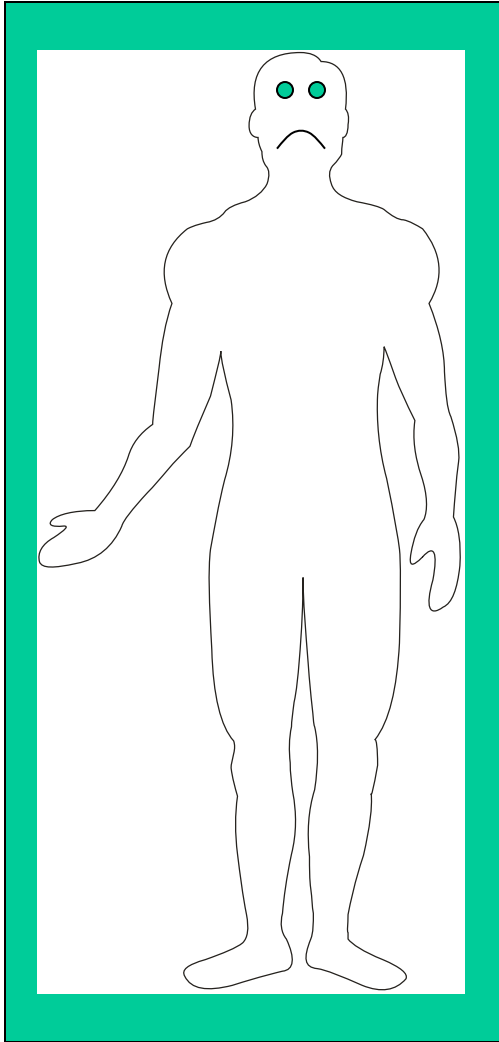
Per un sistema passivo (che non genera energia)
all'equilibrio (non aumenta la temperatura) possiamo
scrivere

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in}$$

Per un corpo sano ($Q_{st}=0$, $dT=0$) a riposo ($W=0$)

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{gen}$$

Consideriamo un uomo “standard” in una stanza chiusa e isolata con una temperatura di 37 ° C, e con aria satura di vapore acqueo.



I meccanismi per scambiare calore sono impediti, quindi $Q_{out} = Q_{in} = 0$

$$\dot{Q}_{st} \text{ o } mc \frac{dT}{dt} \equiv \cancel{\dot{Q}_{in}} - \cancel{\dot{Q}_{out}} + \dot{Q}_{gen}$$

$$mc \frac{dT}{dt} = \text{Metabolismo basale (86 J/s)}$$

Calore specifico del corpo = 3600 J kg⁻¹ °C⁻¹

Peso del uomo = 68 kg

$$\frac{dT}{dt} = \frac{86}{68 * 3600} = 0.0035 \text{ } ^\circ \text{C s}^{-1} = 1.3 \text{ } ^\circ \text{C per ora}$$

Consideriamo le perdite di calore da un uomo standard nudo e a riposo in determinate condizioni ambientali.

Peso del uomo= 68 kg

BMR=86 J s⁻¹

Area esposta = 1.4 m²

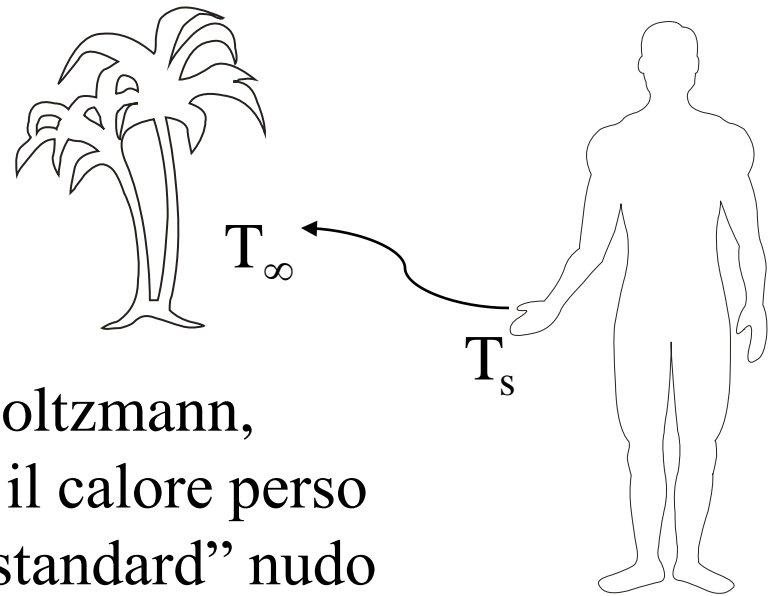
velocita' dell'aria= 0.5 ms⁻¹

temperatura della pelle= 33 ° C

temperatura esterna= 29 ° C



RADIAZIONE



Partendo dall'equazione di Stefan-Boltzmann, possiamo scrivere un'equazione per il calore perso per radiazione da un corpo umano “standard” nudo con area radiante A_r e emissività ε

$$\dot{Q}_r = \sigma A_r \varepsilon (T_s^4 - T_\infty^4) \quad \boxed{\text{T in Kelvin!}}$$

L'emissività del corpo è 0.97 per lunghezze d'onda da 0.1 a 100 μm (infra-rosso), A_r è 1.4 m^2 e $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.
Per $T_s = 33 + 273 \text{ K}$ e $T_\infty = 29 + 273 \text{ K}$,

$$4.7 \text{ W/K/m}^2 \quad \dot{Q}_r = 34.6 \text{ J/s}$$

Corrispondente a
circa 40% del
BMR

Quando la differenza di temperatura tra due superfici e' piccola rispetto ai valori assoluti :

$$(T_s^4 - T_\infty^4) = (T_s^3 + T_s^2 T_\infty + T_s T_\infty^2 + T_\infty^3) (T_s - T_\infty)$$

puo' essere considerato
costante per temperature
intorno a 30 ° C

Il calore perso per radiazione puo' essere anche espresso come

$$\dot{Q}_r = k_r A_r \varepsilon (T_s - T_\infty)$$

T puo' essere in °C

Si può mostrare che k_r e' circa uguale a $6.3 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$

$$k_r = \sigma * 4 * T^3 \text{ per } T = 273 + 30$$

CONDUZIONE

In questo esempio, l'unica zona dell'uomo in contatto con un solido e' la pianta dei piedi, e le perdite sono minime.

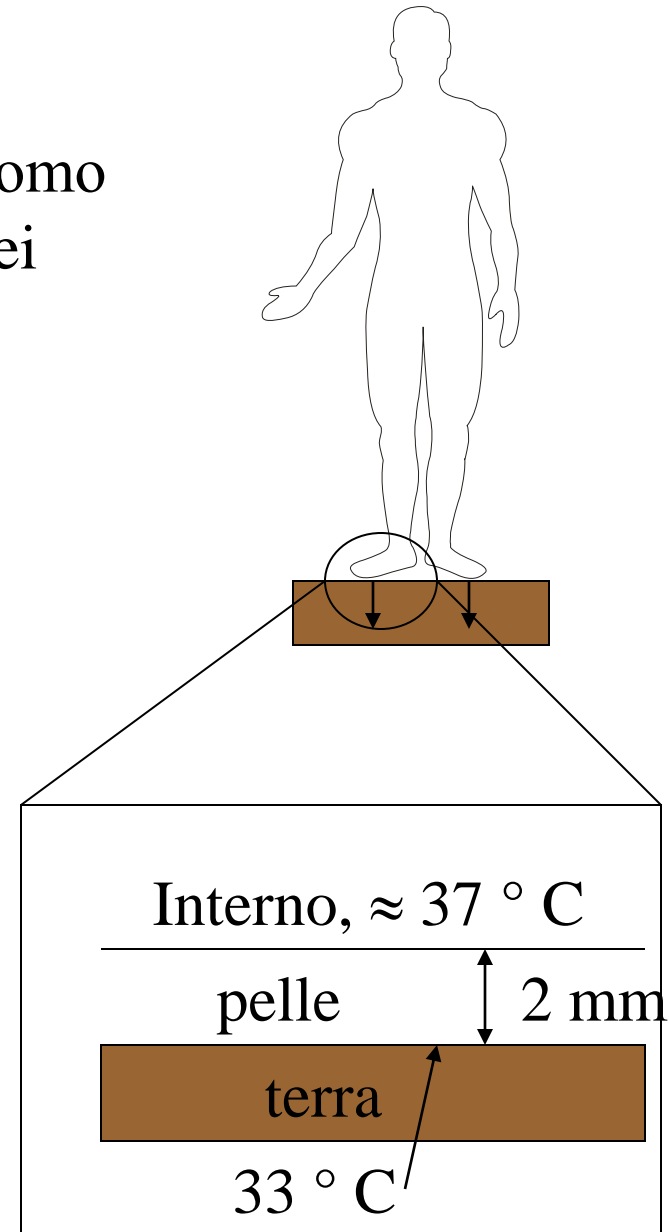
k della pelle $\approx 0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Spessore della pelle $\approx 2 \text{ mm}$

Area di contatto $\approx 50 \text{ cm}^2$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{cond} &= -k_{cond} A_{cond} \frac{dT}{dx} \\ &= \frac{0.5 * 0.005 * (37 - 33)}{0.002} = 5 \text{ J s}^{-1}\end{aligned}$$

6% del BMR

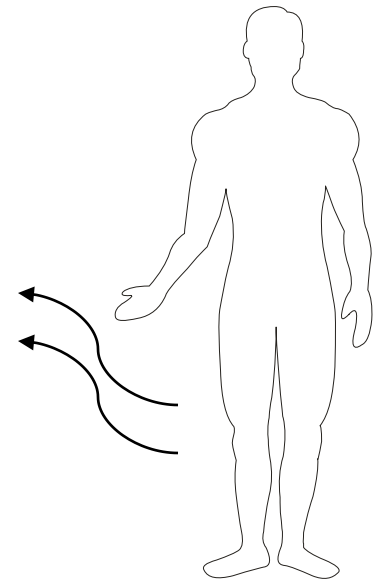


CONVEZIONE

Le perdite convettive dipendono dalla velocità dell'aria.
L'equazione generale viene dalla legge di raffreddamento di Newton.

$$\dot{Q}_c = k_c A_c (T_s - T_a)$$

dove k_c è il coefficiente di trasferimento convettivo, T_a è la temperatura dell'ambiente e A_c è l'area del corpo soggetto a convezione.



Nel caso di un corpo nudo soggetto a convezione libera,

$$k_c \cong 2.46 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Per un corpo nudo soggetto a convezione forzata, si puo' fare riferimento a valori sperimentali disponibili in letteratura.

k_c in $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Condizioni
$6.51v^{0.67}$	In piedi, con flusso d'aria di traverso
$12.09v^{0.5}$	Supino con flusso parallelo
$2.95v^{0.72}$	In piedi con flusso parallelo
$7.44v^{0.67}$	Seduto con flusso verticale

v e' la velocita' in m s^{-1}

Calcoliamo la perdita di calore di un uomo standard nudo per convezione forzata in presenza di vento leggero

$$v=0.5 \text{ ms}^{-1}, A_c=1.4 \text{ m}^2, T_s = 33^\circ \text{ C e } T_a = 29^\circ \text{ C}$$

$$k_c = 6.51 * 0.5^{0.67} = 4.09 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\dot{Q}_c = 4.09 * 1.4 * 4 = 22.9 \text{ Js}^{-1}$$

Circa 27% del BMR

PERDITE PER EVAPORAZIONE

- **DIFFUSIONE** di acqua attraverso la pelle dovuto alla differenza di concentrazione di acqua tra esterno e interno del corpo. **E' una perdita insensibile.**
- **SUDORAZIONE:** dovuto alla produzione di liquidi nelle ghiandole sudorifere
- **RESPIRAZIONE**
 - ◆ Sensibile: dovuto alla variazione di temperatura tra aria inspirata ed espirata
 - ◆ Latente: dovuto alla variazione di umidità tra aria inspirata ed espirata

DIFFUSIONE

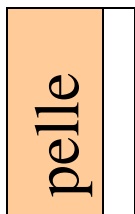
Tipicamente la pelle “traspira” circa 350 ml di acqua al giorno.
Per far evaporare questa quantita’ di acqua ci vogliono

$$\dot{Q}_d = \frac{350 \cdot 2423000}{1000 \cdot 24 \cdot 3600} = 9.8 \text{ Js}^{-1} \quad \left(\dot{Q} = \dot{m}_w H \right) \quad \boxed{11\% \text{ del BMR}}$$

H e’ il calore latente di evaporazione dell’ acqua a circa 30 °C (2423 kJ kg⁻¹).

La quantita’ di acqua eliminata per diffusione dipende dalla differenza tra la pressione di vapore d’acqua sulla pelle e quella dell’ambiente. Un’equazione empirica per il calore perso e’

$$\dot{Q}_d = 3.05 \cdot 10^{-3} A_n (P_s - P_a)$$



A
velo d’acqua, pressione di vapore a 33 °C = P_s (5000 Pascal)

pressione di vapore nell’ambiente, P_a

SUDORAZIONE

La sudorazione e' uno dei meccanismi principali per eliminare il calore in eccesso. L'evaporazione del sudore in un ambiente asciutto smaltisce circa 2.423 kJ per ogni kg di acqua. Se \dot{m}_w e' la velocita' di uscita di sudore,

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_w 2423000 \quad \text{Js}^{-1}$$

In un ambiente umido, il flusso di calore dipende sia dalla velocita' dell'aria che dalle pressioni parziali dell'acqua alla superficie della pelle e dell'aria.

$$\dot{Q}_s = k_s A_w (P_s - P_a)$$

In questo esempio, relativo a un uomo a riposo, non ci sono perdite di calore per evaporazione del sudore.

RESPIRAZIONE

♦ **SENSIBILE**: dovuta alla variazione di temperatura tra aria inspirata ed espirata

♦ **LATENTE**: dovuta alla variazione di umidità tra aria inspirata ed espirata

SENSIBILE: E' semplicemente la differenza di energia interna tra aria ispirata ed espirata.

$$\dot{Q}_{se} = \dot{m}_a C_a (T_{es} - T_{is}) + \dot{m}_w C_w (T_{es} - T_{is})$$

Il calore specifico dell'aria e' $1050 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ mentre per acqua e' $4200 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$. T_{es} e' circa 37 °C e T_{is} e' 29 °C .

$$\dot{m}_a = 1.2 \cdot 10^{-4}, \dot{m}_w = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Kg s}^{-1}$$

$$\dot{Q}_{se} = 1.2 \cdot 10^{-4} \cdot 1050 \cdot 8 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot 4200 \cdot 8 = 1.2 \text{ J s}^{-1}$$

1.4% del BMR

RESPIRAZIONE

Si consideri che un uomo a riposo fa 12 respiri/minuto, e il volume ispirato e espirato = 500 mL. La densità di aria è 1.2 kg/m³. Massa in kg di aria ispirata/s

$$\dot{m}_a = \frac{500 \cdot 12 \cdot 10^{-6}}{60} \times 1.2 = 1.2 \cdot 10^{-4}$$

La massa di acqua espirata si calcola considerando che l'aria espirata è completamente satura con acqua.

La pressione parziale di vapore saturo a 37°C è 47 mmHg, mentre la densità di vapore di acqua è . Quindi la quantità di acqua espirata (kg/s) è

$$\dot{m}_a = \frac{500 \cdot 12 \cdot 10^{-6}}{60} \times 0.8 \times \frac{47}{760} = 5 \cdot 10^{-6}$$

Calore **LATENTE** di evaporazione dovuto al evaporazione di acqua dei polmoni nel aria espirata

$$\dot{Q}_{la} = H_w (\dot{W}_{out} - \dot{W}_{in})$$

H_w e' il calore latente dell'acqua a 37 °C (circa 2423 kJ kg⁻¹),
e \dot{W}_{out} e \dot{W}_{in} sono rispettivamente la massa di acqua espirata
e inspirata per secondo.

Se l'aria e' asciutta, $\dot{W}_{in} = 0$. L'aria espirata e' invece
praticamente satura d'acqua.

$$\dot{W}_{out} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ kg s}^{-1}, \quad \dot{Q}_{la} = 12 \text{ J s}^{-1}$$

14% del BMR

Adesso vediamo la somma totale di perdite in J s^{-1}

$$\dot{Q}_r + \dot{Q}_c + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_d + \dot{Q}_s + \dot{Q}_{la} + \dot{Q}_{se} = \dot{Q}_{Tot}$$

$$34.6 + 22.9 + 5 + 9.8 + 0 + 1.2 + 12 = 85.5 \text{ J s}^{-1}$$

Per un corpo all'equilibrio, senza "input" di energia, che non aumenta di peso o temperatura, il calore perso deve essere uguale al metabolismo.

$$\dot{Q}_{Tot} = \dot{Q}_{BMR}$$

Per un corpo umano che effettua lavoro (es. esercizio fisico) possiamo scrivere:

$$\dot{Q}_{Tot} = \dot{Q}_{BMR} - \dot{W} = \dot{Q}_{BMR} - \eta \dot{Q}_{BMR} = \dot{Q}_{BMR} (1 - \eta)$$

η e' l'efficienza, che ha un valore massimo di 25%

Possibili argomenti per la tesina

- Vestiti termici
- Incubatori per neonati
- La forma del nido di api
- Il ruolo dei globuli rossi nelle proprietà fluidiche del sangue
- Perché le mani crespano nell'acqua
- Termoregolazione nel uomo/bambino/orso polare/pinguini/serpenti
- Pressione sanguigna della giraffa
- Stima titanica
- Volo degli avvoltoi
- Pressione osmotica nelle piante
- Misura della viscosità
- Costanti di diffusione di varie molecole nei tessuti