



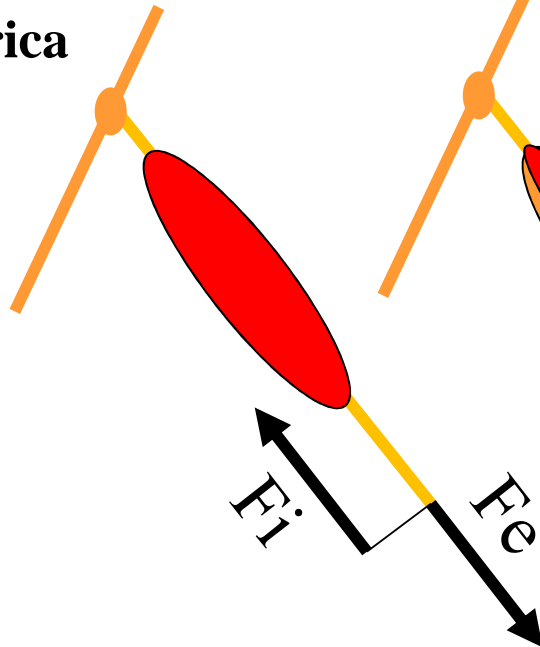
**POLITECNICO**  
MILANO 1863

# BIOINGEGNERIA DEL SISTEMA MOTORIO

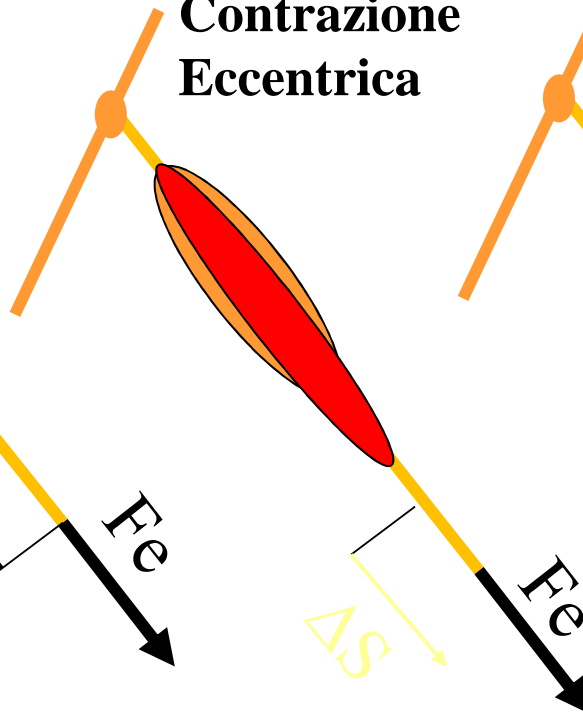
**Sezione: M-Z**

La produzione di energia per il movimento

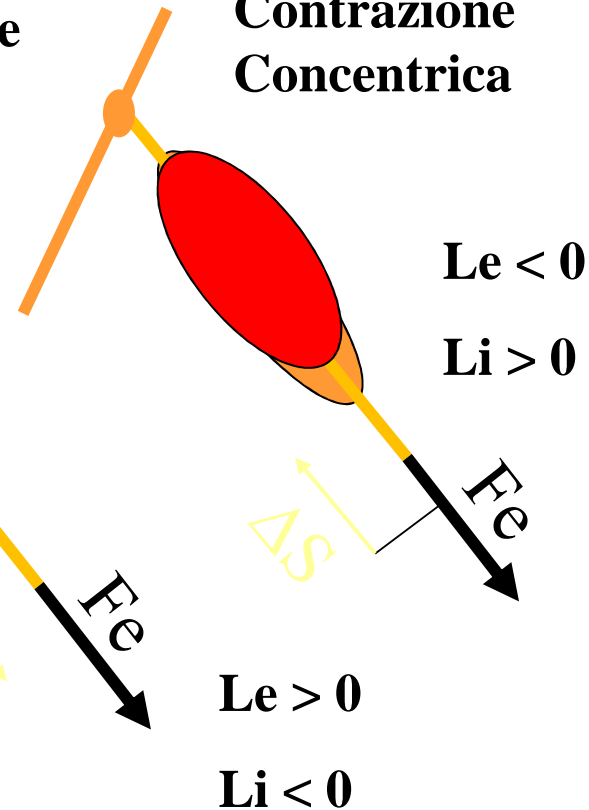
**Contrazione  
isometrica**



**Contrazione  
Eccentrica**

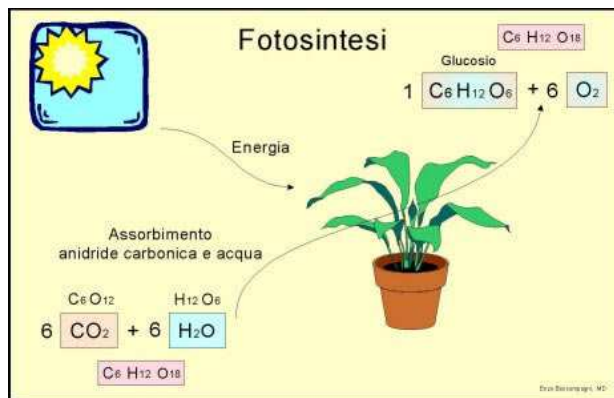


**Contrazione  
Concentrica**



**Lavoro Meccanico:  $L = F \times \Delta S$**

L'energia irradiata dal sole e raccolta dai vegetali sulla terra viene utilizzata per trasformare anidride carbonica e acqua in ossigeno e glucosio mediante fotosintesi



In generale si producono GLICIDI (o CABOIDRATI)

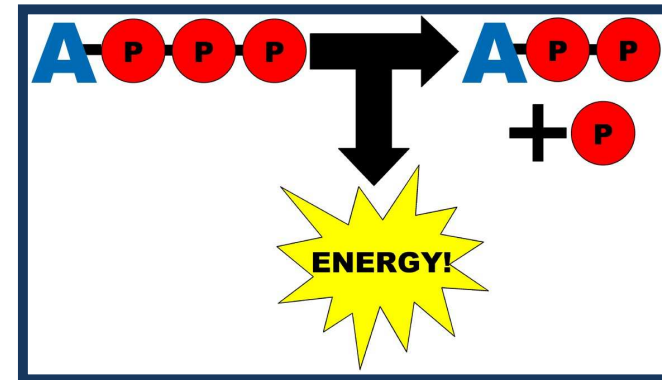
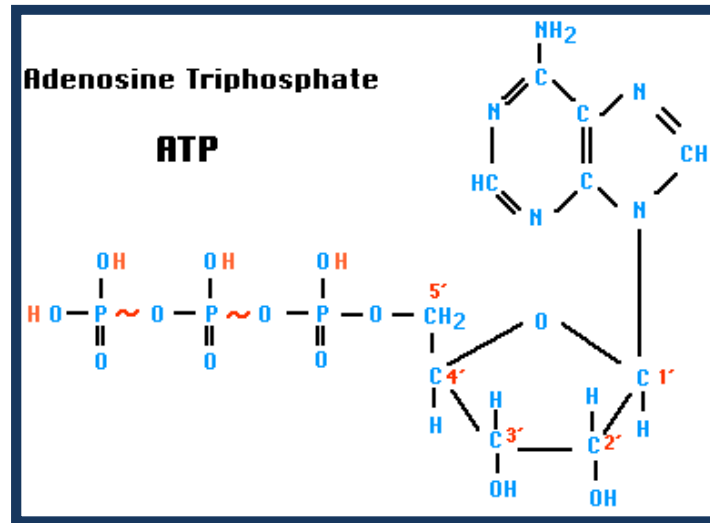
Nelle piante il glucosio può essere trasformato anche in grassi e proteine. Tutte queste sostanze, una volta ingerite, attraverso una serie di complesse reazioni chimiche e sintesi di composti intermedi, giungono a produrre un composto ad **alta capacità esergonica** (cioè in grado di produrre energia all'esterno), che è **l'Adenosintrifosfato (ATP)**.

I carboidrati forniscono **4.2 Kcal/g**

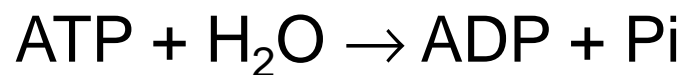


I lipidi **9.5 Kcal/g**





Durante l'idrolisi che avviene durante la **contrazione muscolare**, si rompono i legami del primo e del secondo gruppo fosfato (linee ondulate rosse) generando energia (7.13 Kcal/mole)



(Pi = pirofosfato)

## L'energia prodotta viene utilizzata per quattro scopi fondamentali:

- 1) reazioni di sintesi (per l'accrescimento, la riproduzione, il mantenimento e il rinnovamento dell'organizzazione cellulare)
- 2) la contrazione muscolare
- 3) la trasmissione dell'impulso nervoso
- 4) fenomeni di trasporto attivo

## Scissione dell'ATP in presenza di acqua (idrolisi)



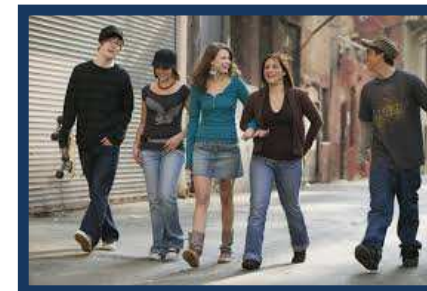
L'energia prodotta dall'idrolisi dell'ATP è stimata essere di circa 12-14 Kcal/mole.

Un uomo a riposo richiede in media 72 Kcal/ora, e utilizza 6 moli/ora di ATP.

Il cammino in piano a 1.3 m/sec (circa 4.7 Km/ora) richiede circa 220 Kcal/ora o 18 moli/ora di ATP.

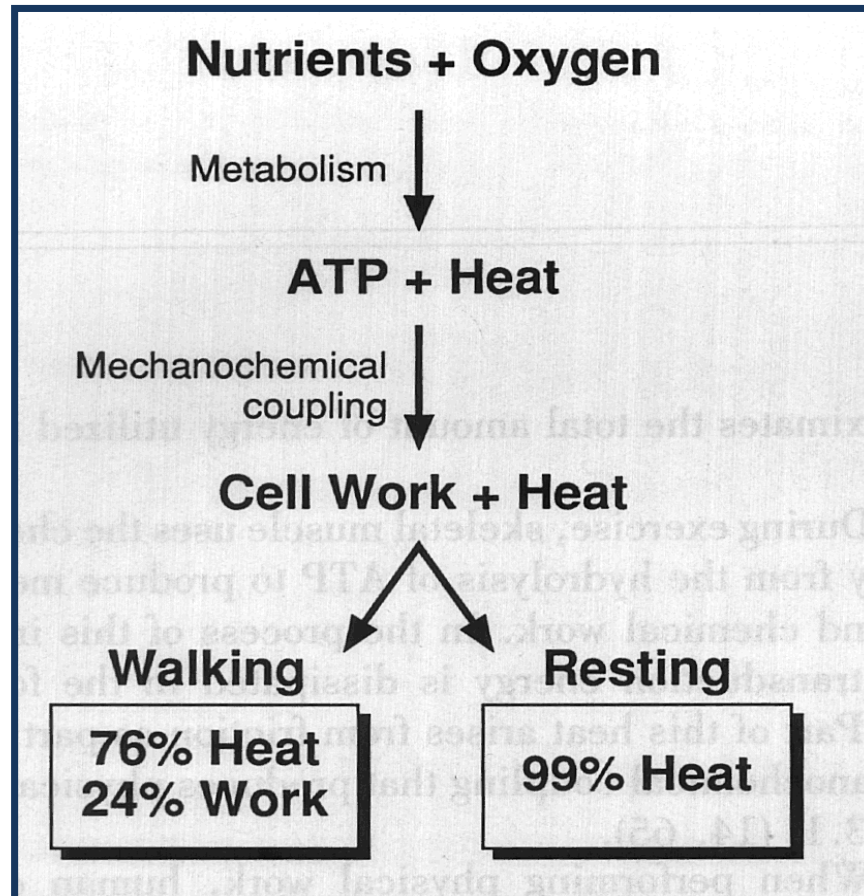


72 Kcal/ora



220 Kcal/ora

# Trasformazioni di energia metabolica in lavoro meccanico





# Reazioni metaboliche

*La contrazione massimale del muscolo scheletrico impiega circa  $17 \cdot 10^{-6}$  moli/g/sec. ATP nel muscolo è  $5 \cdot 10^{-6}$  moli/g (basta per 0.3 sec)*

## **Anaerobiche:**

**ATP  $\leftrightarrow$  ADP+Pi+ Energia**

ricostituzione dell'ATP

**CP+ADP  $\leftrightarrow$  C+ATP**

CP=creatinfosfato C=Creatina

Fosfageno (GP)=CP+ATP

**Glicogeno +Pi+ADP  $\leftrightarrow$  acido lattico+ATP (glicolisi)**

## **Aerobiche:**

**Glicogeno o acidi grassi+Pi+ADP+O<sub>2</sub>  $\rightarrow$  CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+ATP**  
**(fosforilazione ossidativa)**

In generale risulta:  $En = a - b + c + d - e$

A regime ( $a = b$ )  $\rightarrow En = c + d - e$

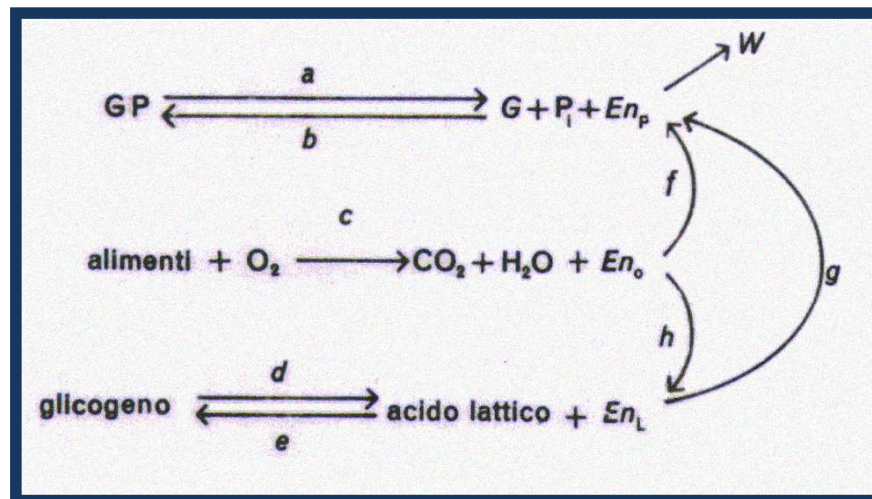
Esercizio submassimale ( $d = e = 0$ )  $\rightarrow En = a - b + c$  ©

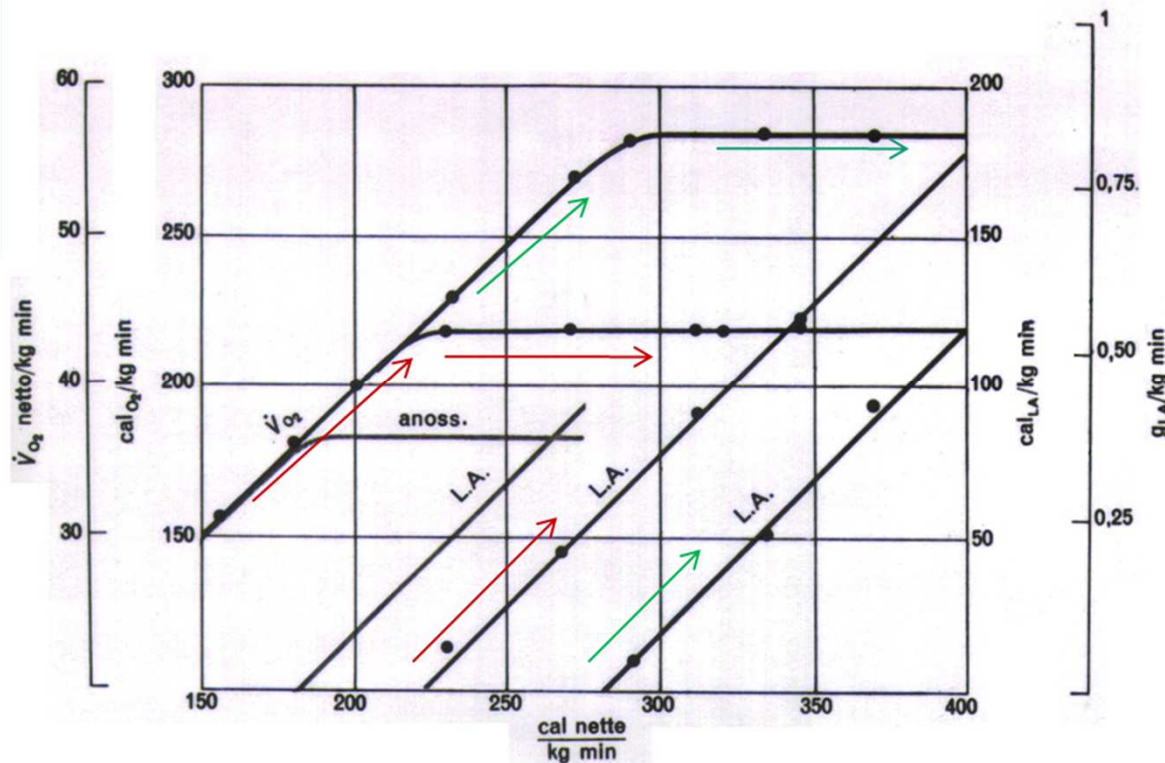
Esercizio sovramassimale ( $c = \text{costante}$ )  $\rightarrow$

$En = c + d - e = c + g$

*Esergoniche* =  $a, c, d$

*Endergoniche* =  $b, e$





*In condizioni SOTTOMASSIMALI:*  $En = M \cdot V_{O_2}$

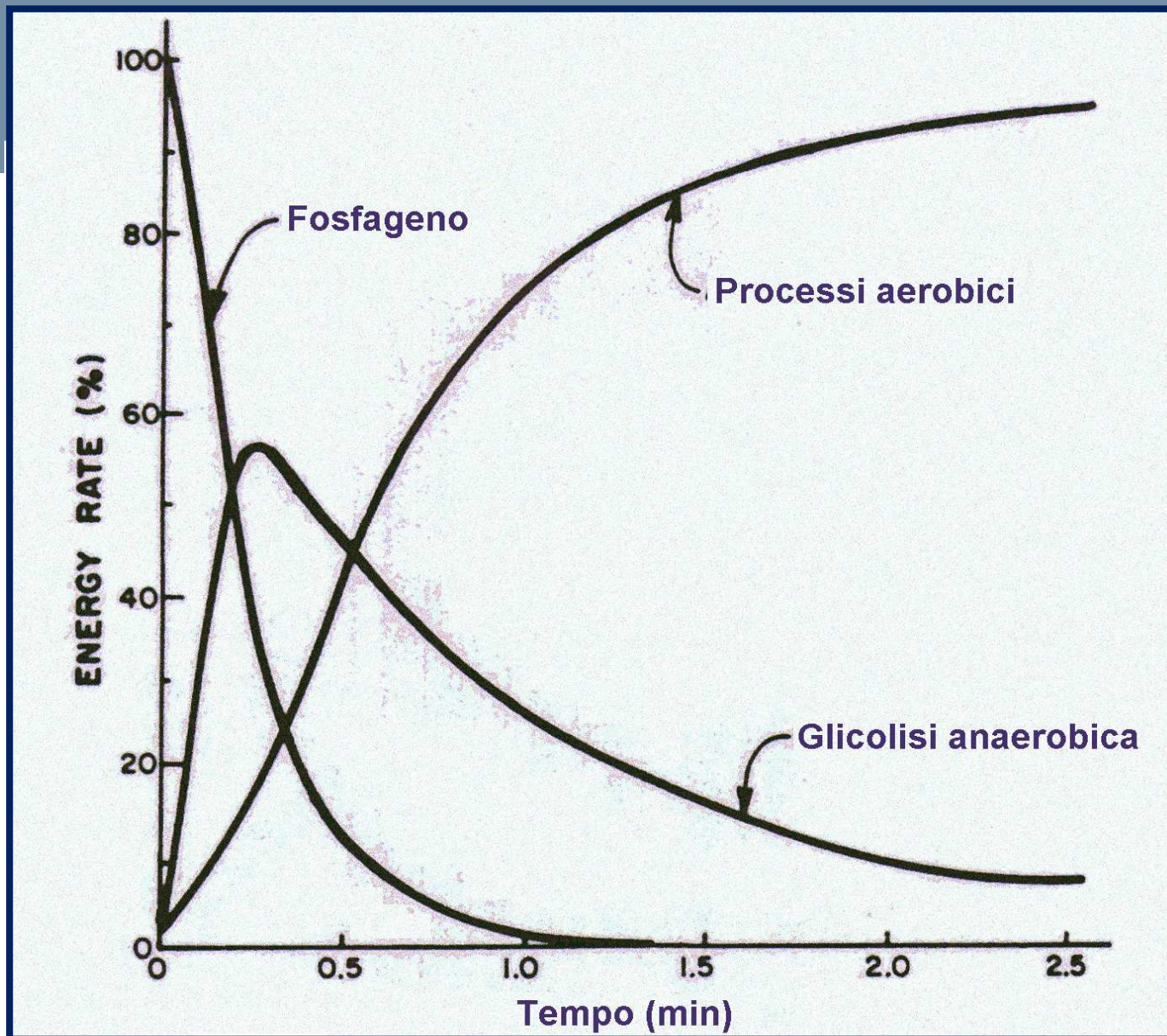
(M = coefficiente energetico dell'ossigeno, circa 5 Kcal/Litro<sub>O<sub>2</sub></sub> )

*In condizioni SOVRAMASSIMALI:*  $En = M \cdot V_{O_2} + N \cdot LA$

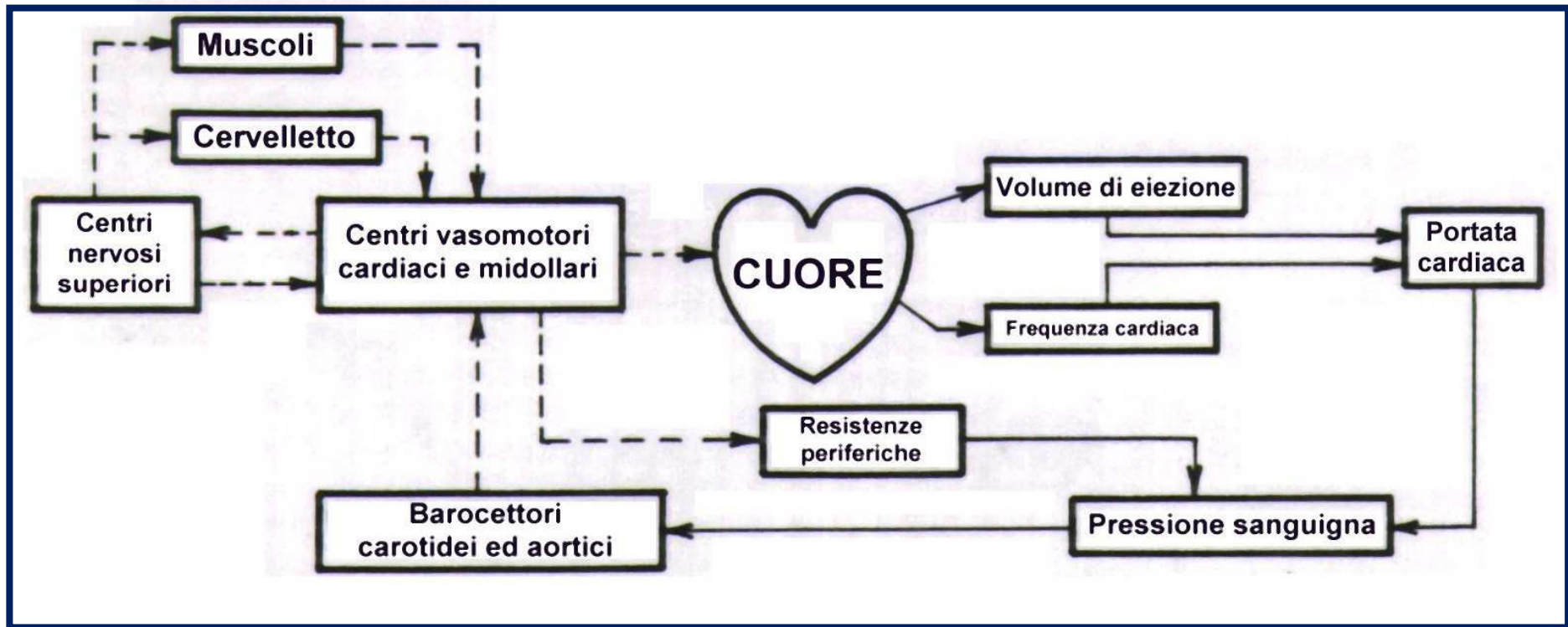
( LA = quantità di acido lattico prodotta, N è l'equivalente energetico della formazione di acido lattico dal glicogeno: N=230 cal/q)

Riferendosi all'unità di tempo:  $\dot{En} = M \cdot \dot{V}_{O_2} + N \cdot \dot{LA}$





# Adattamento cardiovascolare: Regolazione della pressione sanguigna



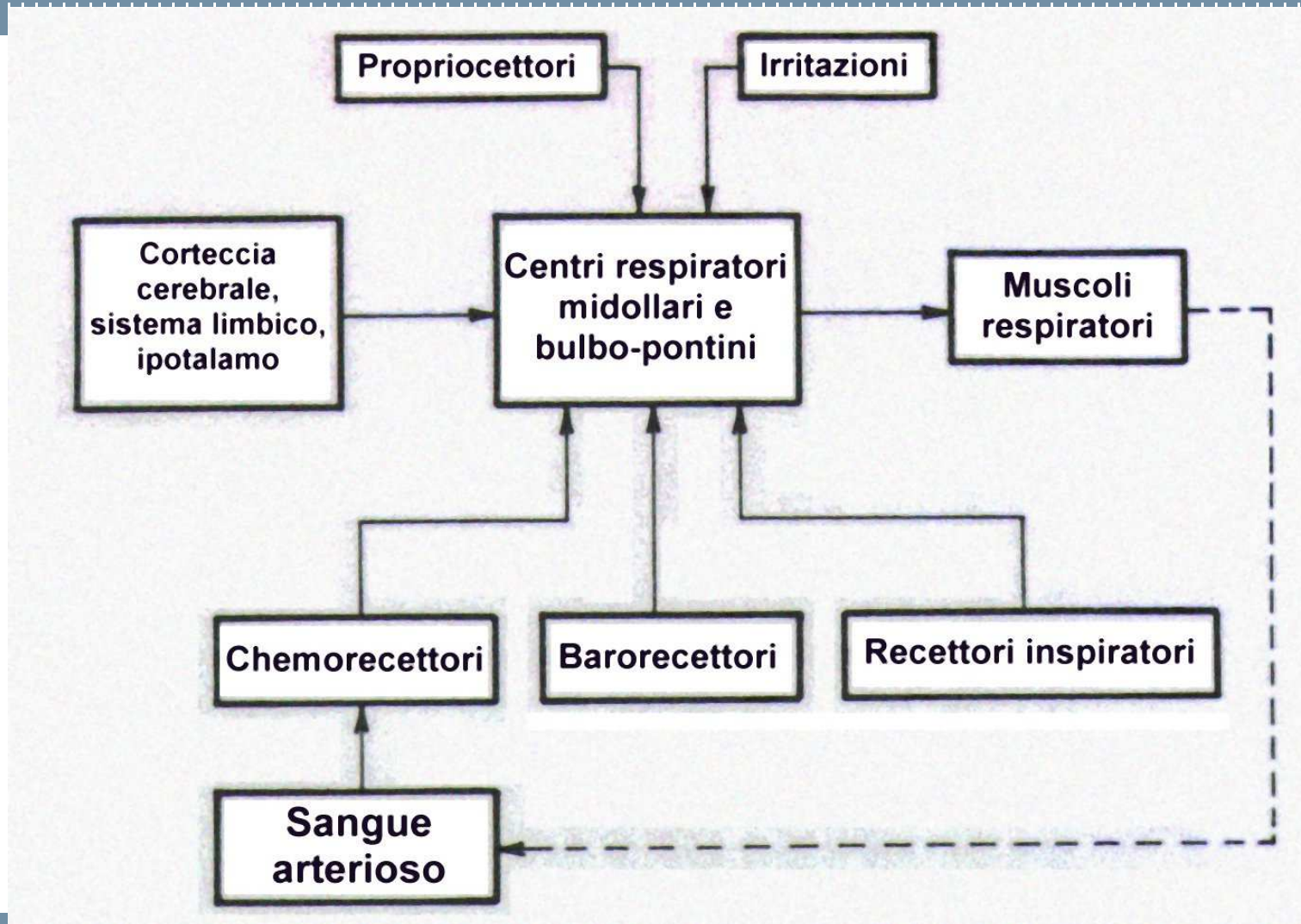
CO = portata cardiaca  
 $f_c$  = frequenza cardiaca  
 $V_e$  = volume di eiezione

$$CO = fc \times Ve$$

—— Effetti meccanici diretti  
- - - - Connessione neurali



# Adattamento respiratorio: schema generale del controllo respiratorio

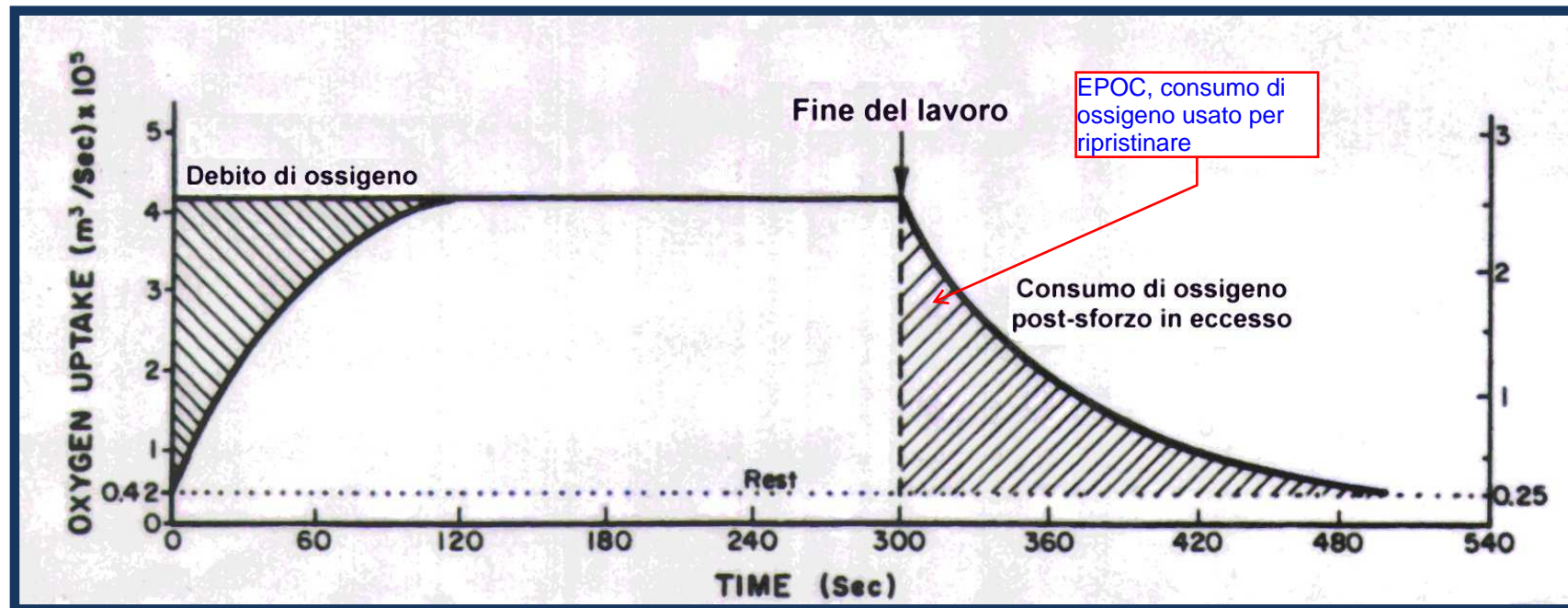


## Comparazione dei tempi di risposta per i tre sistemi principali

| Sistema                   | Costante di tempo dominante [s] |
|---------------------------|---------------------------------|
| Cardiovascolare           | 30                              |
| Respiratorio              | 45                              |
| Termoregolazione corporea | 3600                            |

# Massimo consumo di ossigeno e debito d'ossigeno

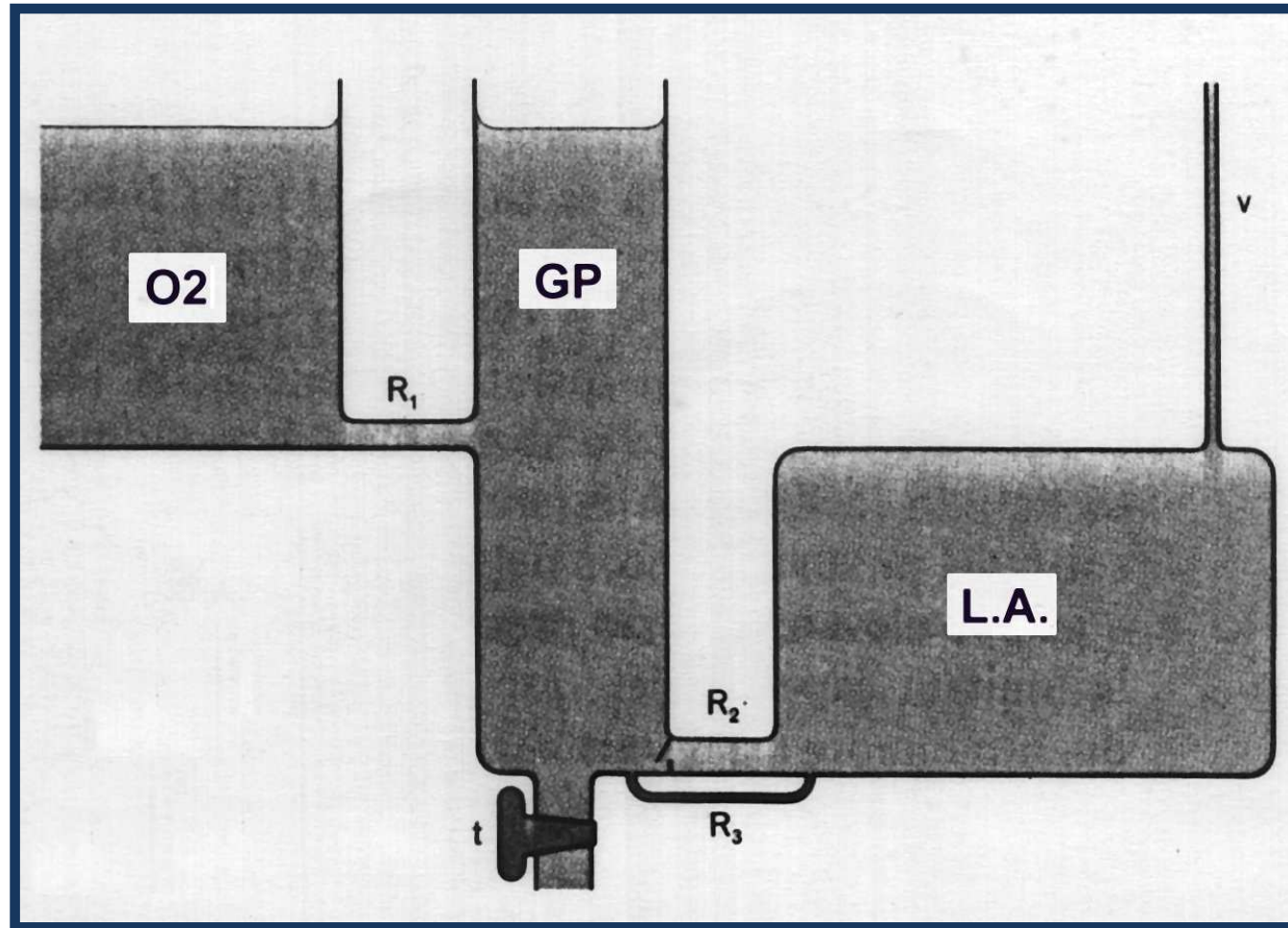
29-11-16



max consumo di ossigeno per normali 2.5L/min, atleti 5L/min. 3 meccanismi: respiratorio, cardiovascolare e temperatura. incremento la quantità di ossigeno in circolo. Il max ossigeno viene perso ogni anno dell'1%. Un esercizio è tanto più efficace quanto meno acido lattico è prodotto. Si deve cercare di fare es. che evitano la produzione dello stesso. Se mi si sviluppa devo attendere un tot. di tempo affinché mi si elimini dal circolo. Cioè in caso contrario significa che sarei ancora nella curva di EPOC che non è conclusa. In più comunque l'acido lattico è fastidioso per l'atleta



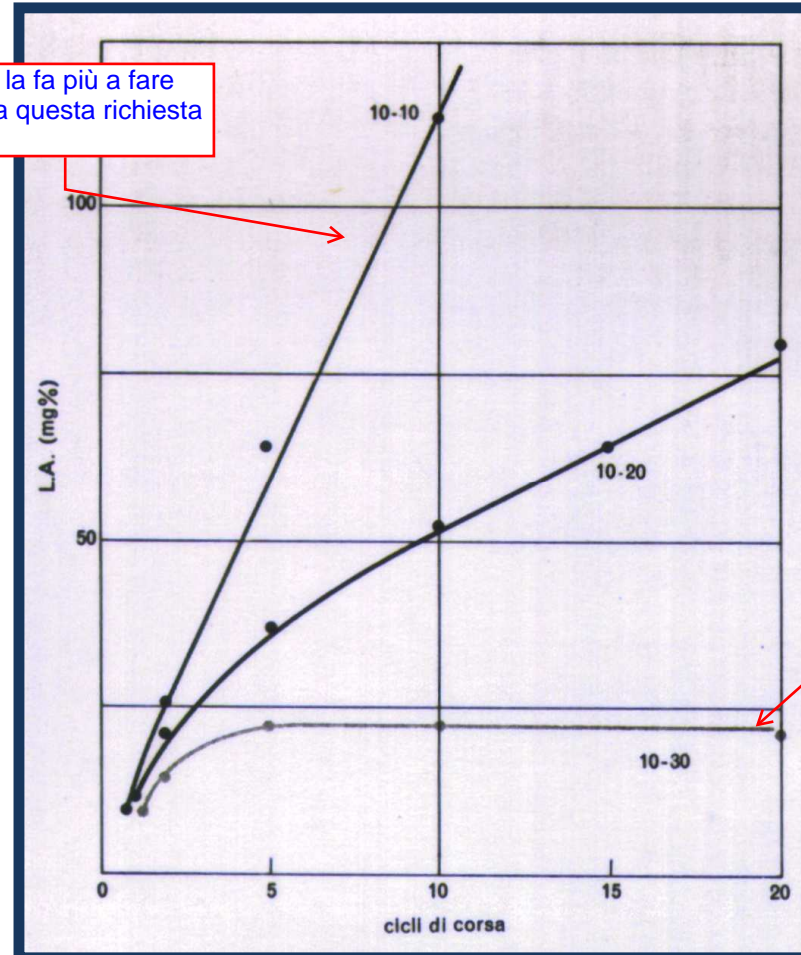
# Modello idraulico del consumo energetico (sempre da Margaria)



# Esercizio massimale intermittente

10.00

non ce la fa più a fare  
fronte a questa richiesta

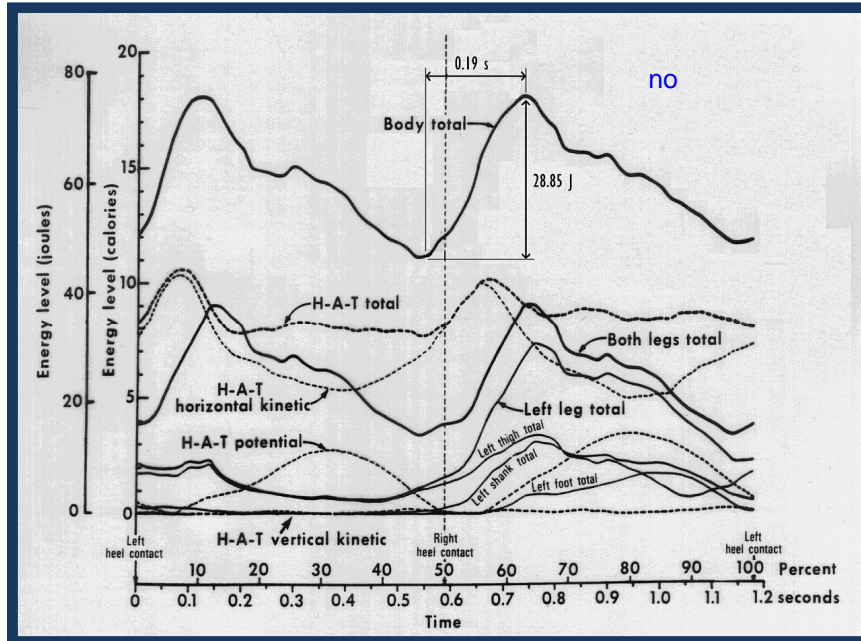
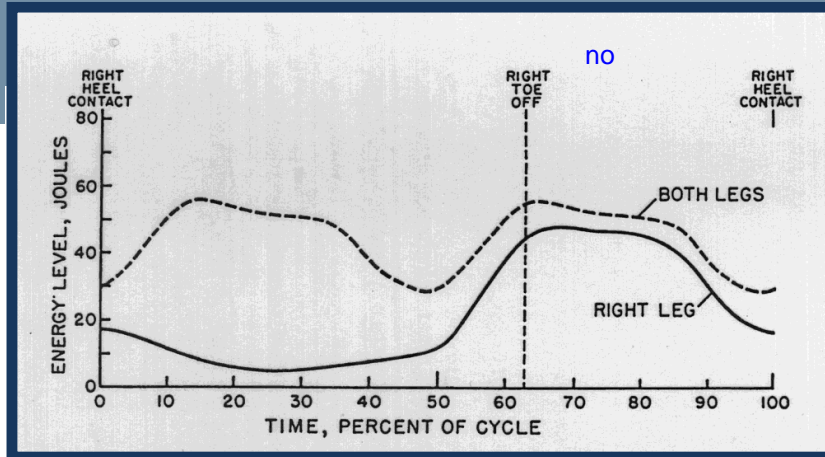


Studi di Margaria per dimostrare che è importante aspettare un tempo necessario per rimuovere l'acido lattico generato. E' un esercizio sovramassimale, se lo faccio in maniera intermittente può essere contratto per un tempo molto lungo.

Guardo dopo 10 cicli di corsa cosa succede in termini di produzione di acido lattico

L'incremento dell'acido lattico si stabilizza, posso ripetere l'esercizio numerose volte, buono per l'allenamento

# Lavoro prodotto e rendimento



lavoro svolto

$$\eta = \frac{L_u}{E_c} \quad \eta = \frac{({}^+L_e^{\text{no}} + {}^+L_i)}{E_w}$$

energia spesa:  
energia chimica

$$\Delta E = (0 + {}^+L_i) = 28.85 \text{ J} = 6.89 \text{ cal}$$

(a ogni passo)

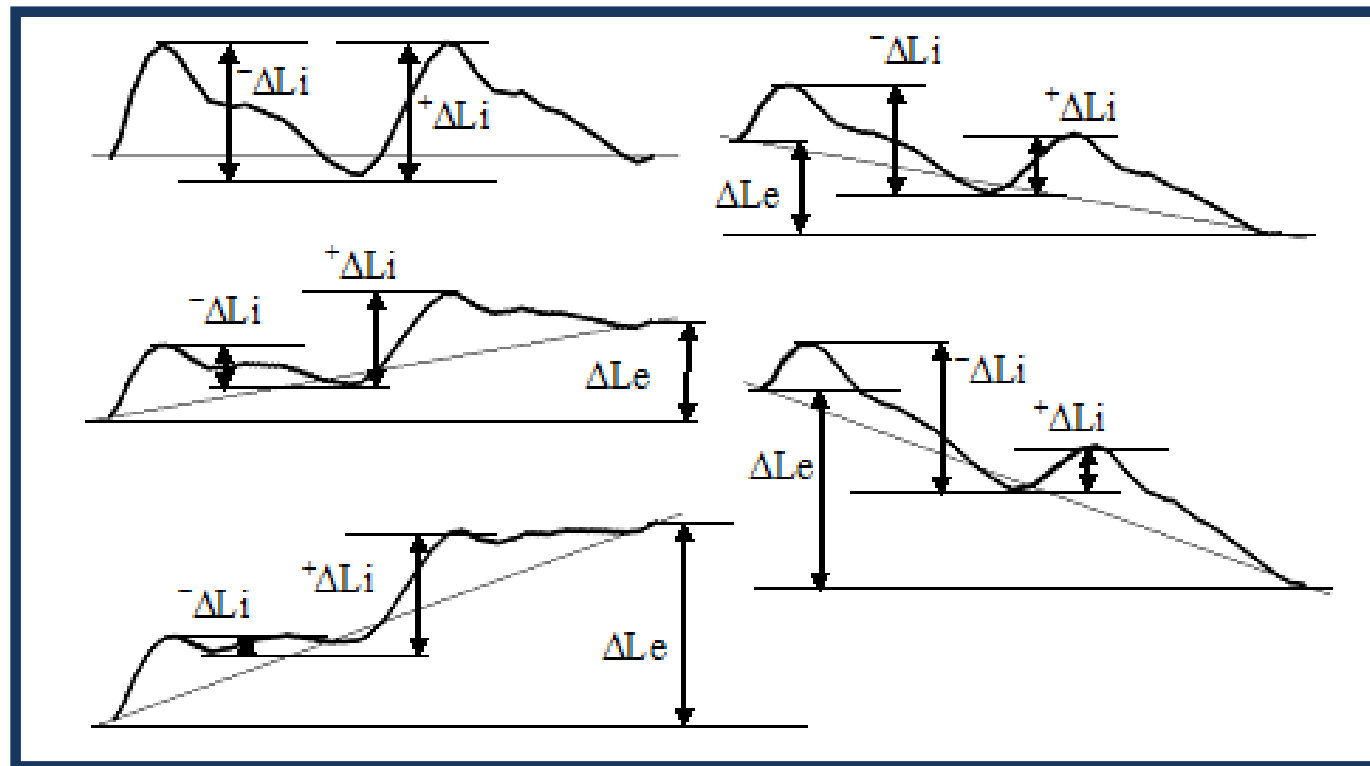
$$100 \text{ passi/min} : 689 \text{ cal}$$

Dato che il soggetto consumava una quantità di ossigeno corrispondente a 3010 cal/min, il rendimento era:

$$\eta = 689/3010 = 0.229$$

20-25%, il resto è dissipato in calore, nel movimento è per vincere resistenze articolari e muscoli antagonisti. Dipende chiaramente dall'esercizio, se sollevi pesi ha il rendimento maggiore, movimenti fini hanno rendimenti minori

no



volume di aria e  
quantitativo respirato

$$E_c = 4.92 \cdot V \cdot \frac{20.93 - O_e}{100} \quad \text{Kcal/L}_{\text{aria}}$$

Dal consumo di O<sub>2</sub> sappiamo l'energia consumata, possiamo valutare anche il rendimento a parità di condizione con soggetti sani. Ad es. spasticità causa co-contrazione e perciò rendimento molto minore

Il consumo metabolico basale  
(stato di riposo, 3-4 ore dopo il pasto). Dipende dalle percentuali di grasso nella massa totale. Riferendolo alla massa magra, le differenze tra somatotipi svaniscono.

Differenze tra uomo e donna:  
circa 17.2 cal/Kg/min per l'uomo, 16.4 cal/Kg/min per la donna.

Durante il cammino il consumo di ossigeno correla meglio con la massa totale del corpo

Consumo metabolico in postura seduta:  
da 19.5 a 21.4 cal/Kg/min (circa 1.22 volte il consumo a riposo). Variabilità intersoggettiva, senza significativa differenza tra i due sessi.

Il quantitativo di en spesa viene rapportato alla massa dell'individuo. La differenza si annulla se questi valori sono rapportati alla massa magra.

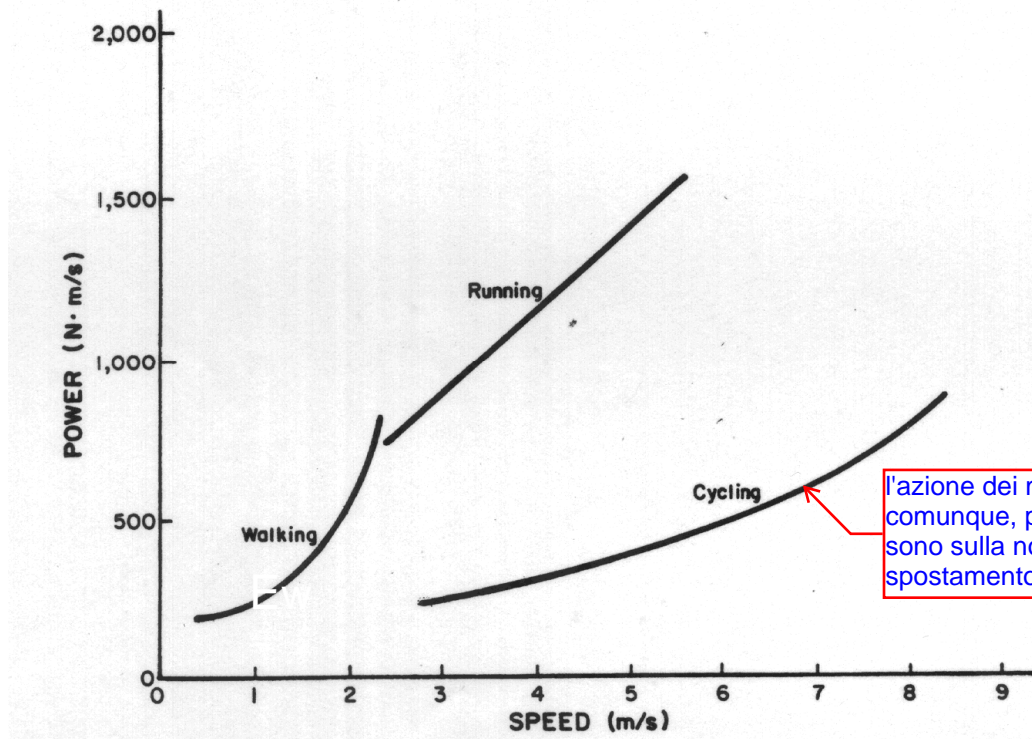
Consumo metabolico in postura eretta:  
circa 22.1 cal/Kg/min per l'uomo e 19.9 cal/Kg/min per la donna.  
Riferito alla massa magra: 24.5 per le donne e 24.8 per gli uomini (1.25 volte il consumo a riposo)

"Consumi dati per curiosità"



## Il consumo metabolico durante il cammino dipende dal quadrato della velocità (mentre nella corsa varia linearmente).

$$E_w = a + b \cdot v^2 \text{ con } E_w [\text{cal/Kg/min}] ; v [\text{m/min}] ; a \text{ e } b \text{ costanti (} a = 32 \text{ e } b = 0.0050\text{)}$$



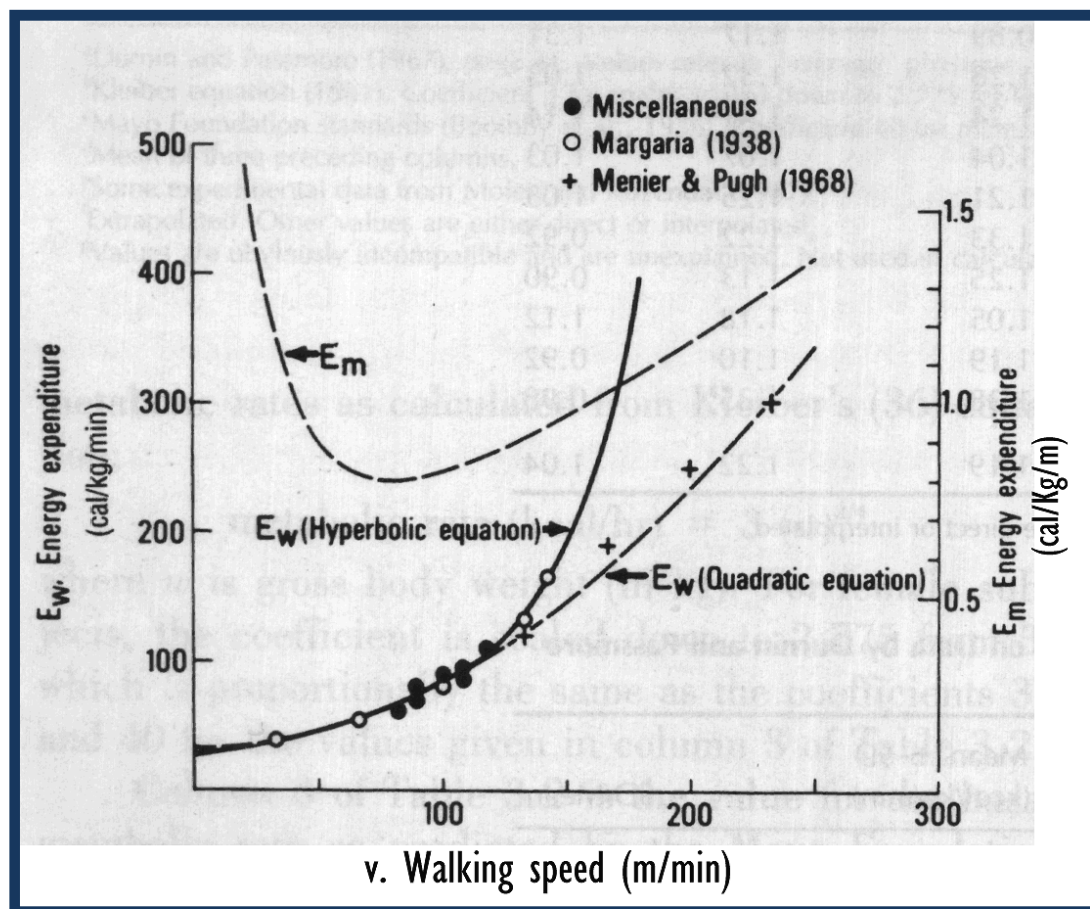
Cammino, rendimento 24%, a bassa velocità invece diventa anche 14%. Il consumo metabolico durante il cammino dipende dal quadrato della velocità.

Nella corsa il range articolare è maggiore. Se cammino però il comportamento del CoM ha escursioni che diventano più importanti con la velocità. Il piccolo valle piccolo viene aumentato quanto più è alta la velocità! Intorno a 2.5 metri al secondo l'energia spesa per camminare è più alta di quella spesa per correre.

l'azione dei muscoli c'è comunque, però se sono sulla non ho lo spostamento del CoM

Il CoM si riduce di spostamento tramite i movimenti compensatori, che possono mancare in bambini spastici.

# Consumo energetico nel cammino



$$E_w = 32 + 0.005 \cdot v^2$$

## Espressione iperbolica

$$E_w = \frac{E_0}{\left(1 - s^2/s_u^2\right) \cdot \left(1 - n^2/n_u^2\right)}$$

$$E_w = \frac{E_0}{\left(1 - v/v_u\right)^2}$$

Ci sono studi che riportano l'andamento dell'en spesa andando a considerare grandezze che implicano anche la grandezza del passo e la frequenza del passo. Se siamo fermi, l'energia meccanica corrisponde a quella metabolica, quindi possiamo correlare la formula di en. del cammino con quella metabolica.

Costo energetico  
del metro percorso  
(E<sub>w</sub>/v)

$$E_m = \frac{32}{v} + 0.005 \cdot v$$

Otengo il costo energetico dell'individuo sapendo la velocità