

Costo energetico del nuoto

Valentina De Cosmi
valentina.decosmi@gmail.com

Obiettivi

- Misura diretta e indiretta della spesa energetica in relazione a un determinato lavoro
 - Fattori che influenzano la spesa energetica a riposo e durante il lavoro muscolare
 - Realizzare un'economia nel dispendio energetico per migliorare e ottimizzare la performance sportiva
- Legame stretto con il concetto di EFFICIENZA o rendimento: la percentuale di energia spesa che viene effettivamente trasformata in lavoro meccanico esterno

Energia e ATP

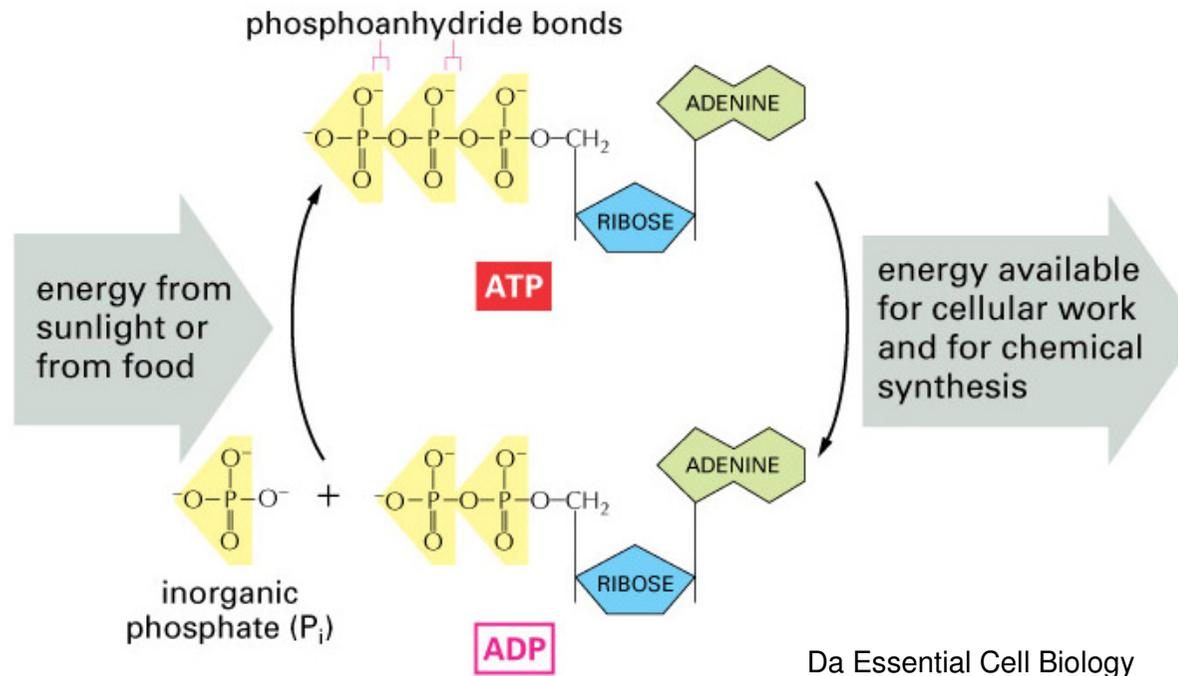
- Immagazzinata all'interno dell'organismo
- Dispersa nell'ambiente sottoforma di calore
- Restituita all'ambiente sottoforma di lavoro

- Qualunque sia il tipo di energia prelevata dall'ambiente essa viene trasformata in energia chimica contenuta nei legami dell'ATP

- L'ATP viene scambiata tra i processi che la formano e quelli che la utilizzano



Questa reazione nella cellula fornisce 12.5 Kcal/mol



- I vari sport si distinguono anche per il meccanismo di produzione
- Intensità e durata dell'esercizio dipendono dal tipo di energia utilizzata

Sistemi esoergonici

Il lavoro muscolare richiede l'attivazione dei sistemi
ESOergonici dell'organismo

- Di tipo aerobico: se avvengono in presenza di ossigeno
- Di tipo anaerobico: se avvengono in assenza di ossigeno

- Anaerobico alattacido
- Anaerobico lattacido
- Aerobico

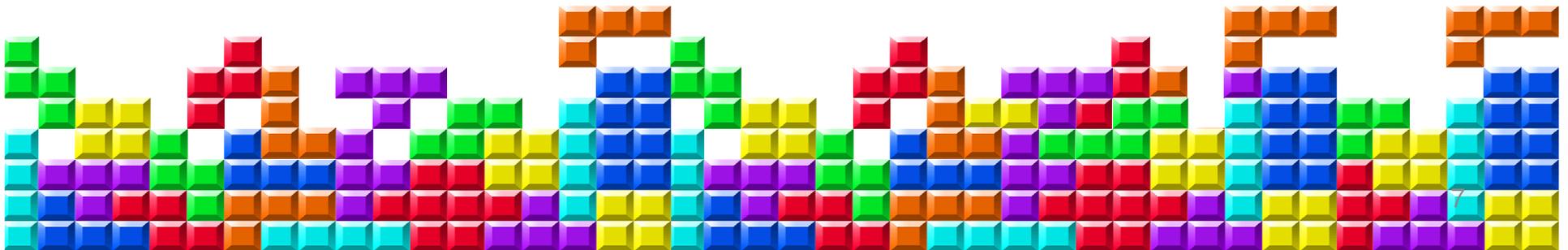
Table 4 Percentage contribution of aerobic (E_{aer}), anaerobic lactic acid (E_{anlac}) and anaerobic alactic acid sources (E_{analac}) of energy to the overall energy expenditure for all subjects during maximal

trials. *Distance* Distance covered during maximal trials, *n* number of subjects, *Speed* average speed maintained during maximal trials

Distance (m)	Stroke	<i>n</i>	Speed ($m \cdot s^{-1}$)		E_{aer} (%)		E_{anlac} (%)		E_{analac} (%)	
			mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
45.7	Crawl	8	1.97	0.07	15.3	6.06	58.9	8.36	25.8	4.16
	Backstroke	3	1.73	0.05	17.4	3.10	59.4	3.81	23.1	0.74
	Breaststroke	6	1.50	0.10	27.1	2.86	43.7	8.10	29.3	5.59
	Butterfly	3	1.85	0.08	16.9	1.50	57.3	1.40	25.9	0.20
		20	1.75	0.20	19.4	6.64	54.2	9.74	26.4	4.37
91.4	Crawl	8	1.75	0.05	33.3	2.30	47.2	4.61	19.6	2.51
	Backstroke	3	1.64	0.03	36.4	2.69	43.6	1.96	20.0	1.31
	Breaststroke	6	1.34	0.09	46.5	8.06	34.8	11.16	18.7	3.61
	Butterfly	3	1.63	0.11	33.3	1.13	47.5	2.67	19.2	2.29
		20	1.59	0.19	37.7	7.47	43.0	8.56	19.3	2.59
182.9	Crawl	8	1.62	0.05	61.5	2.46	24.7	2.81	13.8	0.20
	Backstroke	3	1.52	0.03	59.2	0.97	28.2	0.53	12.6	1.21
	Breaststroke	6	1.23	0.09	67.9	4.21	21.7	4.39	10.4	1.29
	Butterfly	3	1.41	0.01	61.1	4.13	26.6	4.10	12.3	0.04
		20	1.45	0.19	63.0	4.48	24.6	3.88	12.4	1.81

Perché sapere tutto questo?

- Con quale intensità proporre un'attività all'atleta?
- Per quanto tempo?
- L'attività proposta permette di raggiungere gli obiettivi programmati nel percorso di allenamento?



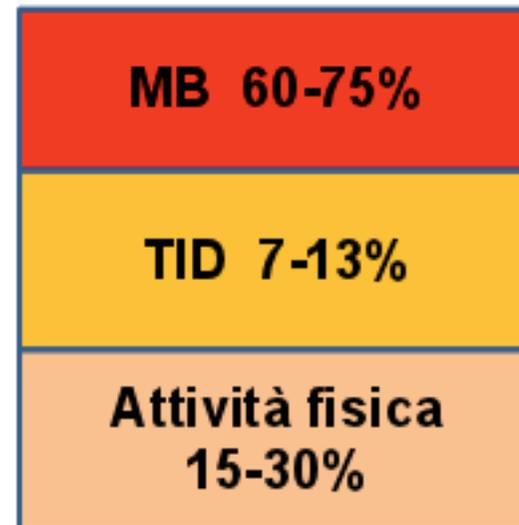
Dispendio energetico totale

Componenti

- Metabolismo basale
- Termogenesi indotta dalla dieta
- Attività fisica

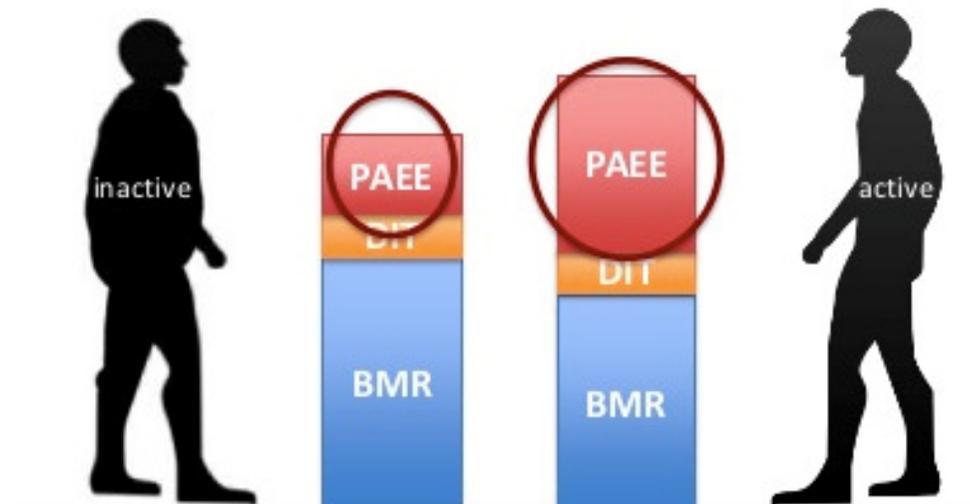
Condizioni fisiologiche particolari

- Crescita
- Gravidanza
- Allattamento



Attività fisica

- 15-30% della spesa energetica totale
- Dipende da: attività individuale, durata, intensità e frequenza
- Le attività definite ricreative sembrano incidere maggiormente sulla spesa calorica giornaliera
- La spesa energetica per l'esercizio fisico è l'unica a poter variare in funzione della volontà dell'individuo
- Ampia variabilità INTRA e INTER- individuale



Il dispendio energetico giornaliero può aumentare considerevolmente in funzione dell'intensità e della durata dell'attività fisica

I ricercatori si sono occupati di calcolare il costo energetico delle attività più varie: da quelle ricreative (guidare l'auto, giocare a ping pong, ballare, lavarsi i denti), a quelle lavorative (impiegato in banca, operaio), fino alle attività sportive (ciclismo, nuoto, corsa...).



Il costo energetico

- La misurazione del costo energetico delle differenti forme di attività fisica (non solo in ambito sportivo ma anche lavorativo) è utile per definirne l'impegno metabolico e il fabbisogno calorico.
- La quantità di energia necessaria per percorrere una distanza unitaria.

Unità di misura

- L'unità di misura nel S.I. del lavoro è il Joule (1J = lavoro svolto quando il punto di applicazione della forza di un N è spostato di 1 metro lungo la direzione della forza)

4.185 kJ = 1 kcal

1 L Ossigeno consumato nell'organismo umano sviluppa circa 5 Kcal

- Possiamo esprimere il costo energetico come consumo di ossigeno o kcal per distanza unitaria (litri di O₂/km).
- Per confrontare soggetti di taglia differente si normalizza il costo per il peso corporeo
- Costo energetico → **KJ/Kg/Km**
→ **ml O₂ /Kg/Km**

Il costo energetico (CE) per una data forma di attività fisica è il rapporto tra dispendio energetico per unità di tempo (potenza metabolica) e la velocità (The Energy Cost of Human Locomotion on Land and in Water, Di Prampero 1986)

$$\begin{array}{c}
 \text{ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \\
 \text{oppure} \\
 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}
 \end{array}
 \leftarrow \text{CE} = \frac{\dot{E}}{v}
 \begin{array}{c}
 \rightarrow \text{litri O}_2 \cdot \text{min}^{-1} \\
 \text{oppure} \\
 \text{ml O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \\
 \\
 \rightarrow \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} \\
 \text{oppure} \\
 \text{Km} \cdot \text{h}^{-1} \\
 \text{oppure} \\
 \text{Km} \cdot \text{min}^{-1}
 \end{array}$$

dove:

\dot{E} = **POTENZA METABOLICA:** dispendio energetico per unità di tempo ($V'O_2/\text{min}$)*

v = **VELOCITA':** m/sec, Km/h, km/min (1 m/sec = 3.6 Km/h)

Massimo volume di Ossigeno

- L'indice principale dello stato di allenamento aerobico è il **VO₂ max** o **massimo volume di ossigeno** consumato nell'unità di tempo, in risposta a una richiesta energetica crescente (ml/Kg/min)
- È la **massima potenza aerobica**
- Indice della capacità dell'individuo di sintetizzare ATP per via aerobia
- Per fabbisogni energetici superiori al VO₂ max, l'organismo ricorre alla glicolisi anaerobica con conseguente aumento di acido lattico plasmatico
- Fattori che influenzano la risposta all'allenamento aerobico:
 - capacità aerobica iniziale
 - intensità
 - frequenza
 - durata

Obiettivo del nuotatore

- Coprire la distanza di gara nel minor tempo possibile
- Sviluppare la massima velocità media per quella distanza
- $\text{Velocità} = \text{potenza sviluppata dal nuotatore} / \text{costo energetico della nuotata}$

Misurare il costo energetico

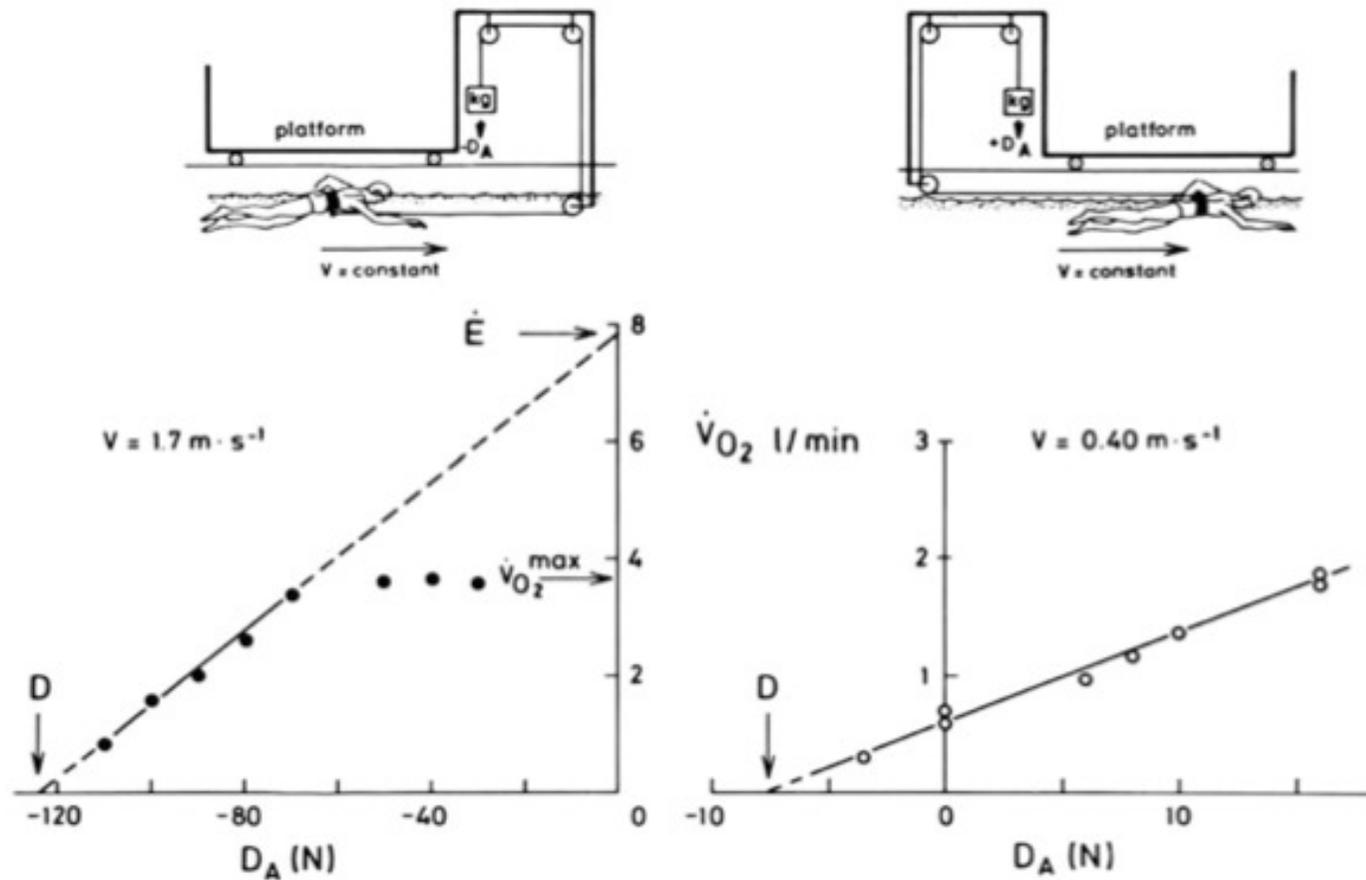
- **VO₂ netto**
- Spesa energetica totale: potenza metabolica registrata durante la valutazione dell'attività fisica in esame
- Spesa energetica netta: spesa energetica totale - potenza metabolica in condizioni di riposo

- **Intensità dell'esercizio**
- Assunti: il soggetto sta utilizzando solamente energia aerobica e si trova in equilibrio tra dispendio e richiesta

- **Durata dell'esercizio**
Prerequisito: stabilità nel tempo del dispendio energetico (il carico di lavoro deve essere costante e di durata non inferiore a 6 minuti).

Applicati test specifici per misurare tali variabili in situazioni di esercizio controllate

Fig. 5 Net oxygen consumption ($\dot{V}O_2$, $l \text{ min}^{-1}$) when swimming the front crawl at constant speed (*left panel* 1.7 m s^{-1} , *right panel* 0.4 m s^{-1}) as a function of the added drag (D_A , N). *Upper panels* show the method used to apply known forces to the swimmer's body. See text for details. Taken from di Prampero (1986) (with kind permission of Georg Thieme Verlag KG)



Energetics of swimming: a historical perspective P. Zamparo • C. Capelli • D. Pendergast
 Eur J Appl Physiol (2011) 111:367–378

Classificare l'intensità di un'attività

Ci si può basare su:

- Consumo energetico (Kcal/min)
- Consumo di ossigeno (ml/min)
- Unità MET

Calcolo della spesa energetica

- Misura del consumo di Ossigeno al minuto
- Equivalente calorico dell'Ossigeno è ≈ 5 Kcal/L

Esempio

Uomo di 82 Kg, altezza 1,83m

30' nuoto stile libero con consumo di O_2 pari a 2L/min

$2L/min \times 30' = 60L$ consumo totale di O_2

$60L/min \times 5 Kcal/L = 300 Kcal$ spesa energetica totale

(questo valore comprende il metabolismo basale)

MET (Metabolic Equivalent)

- Esistono tabelle per quantificare l'intensità di un'attività
- MET: multiplo del consumo energetico in condizioni basali
- 1 MET corrisponde all'energia spesa in condizioni di riposo. Per convenzione corrisponde a un consumo di O₂ pari a 3.5ml/Kg/min

$$1 \text{ MET} = 3.5 \text{ml O}_2 / \text{Kg} / \text{min}$$

Metabolic Equivalents (METS) in Exercise Testing, Exercise Prescription, and Evaluation of Functional Capacity

M. JETTÉ, K. SIDNEY,* G. BLÜMCHEN†

Department of Kinanthropology, School of Human Kinetics, University of Ottawa, Ottawa, Canada; *Present affiliation: Laurentian University, Sudbury, Ontario, Canada †Klinik Roderbirken, Leichlingen, Federal Republic of Germany

Attività fisica leggera, moderata, pesante

Level	Energy expenditure			
	kcal/min	ml/kg/min	W	METS
Men				
Light	2.0-4.9	6.1-15.2	28-69	1.6-3.9
Moderate	5.0-7.4	15.3-22.9	70-104	4.0-5.9
Heavy	7.5-9.9	23.0-30.6	105-139	6.0-7.9
Very heavy	10.0-12.4	30.7-38.3	140-174	8.0-9.9
Unduly heavy	12.5-	38.4-	175-	10.0-
Women				
Light	1.5-3.4	5.4-12.5	21-48	1.2-2.7
Moderate	3.5-5.4	12.6-19.8	49-76	2.8-4.3
Heavy	5.5-7.4	19.9-27.1	77-104	4.4-5.9
Very heavy	7.5-9.4	27.2-34.4	105-132	6.0-7.5
Unduly heavy	9.5-	34.5-	133-	7.6-

MET del nuoto

Activity	METs ^a	Watts ^b	Intensity					
			Light		Moderate		Heavy	
			METS	W	METS	W	METS	W
Skating (ice) (km/h)			4	70	7	123	13	228
18	4.0	70						
25	4.8	84						
28	9.2	161						
32	10.8	189						
36	15.2	266						
Snorkeling			4	70	5	88	6	105
Snowmobiling	2-3	35-53	3	53	3.5	61	5	88
Snowshoeing (4 km/h)	9.5	166	5	88	7	123	10	175
Soccer	10.3	180	5	88	7	123	11	193
Softball	3-6	53-105	3	53	4	70	5	88
Squaredancing	4.8	84	3	53	5	88	7	123
Squash	8-12	140-210	6	105	9	158	12	210
Swimming (beach)			2	35	3	53	4	70
Swimming (pool) (km/h)			3	53	5	88	9	158
2.0	4.3	75						
2.5	6.8	119						
3.0	8.9	156						
3.5	11.5	201						
4.0	13.6	238						
Synchronized swimming			4	70	6	105	8	140
Legs only	8.7	152						
Arms only	9.8	172						

Vantaggi e limiti

- Classificare rapidamente l'intensità di un esercizio
- Classificare la corrispondente richiesta energetica

- È uno standard creato su uomo di 65 Kg e donna di 55 Kg
- È una stima, non è una misura reale specifica per un determinato soggetto



ma...

Variabilità inter-individuale del CE

Inaffidabile il calcolo con tabelle di riferimento

È relativamente costante fino alla velocità di 1 m/s
e aumenta in modo esponenziale con la velocità

Prampero PE di. The energy cost of human locomotion on land and in water. Int J Sports Med 1986;7:55-72.

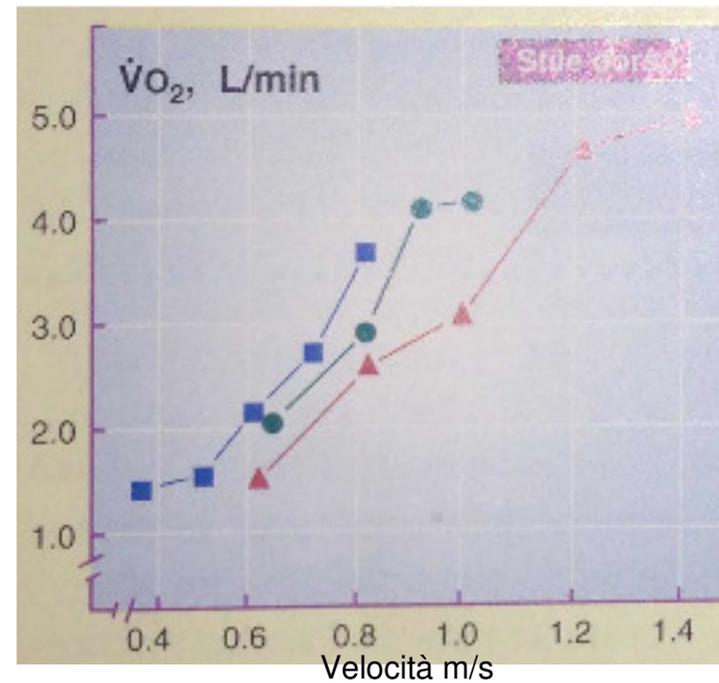
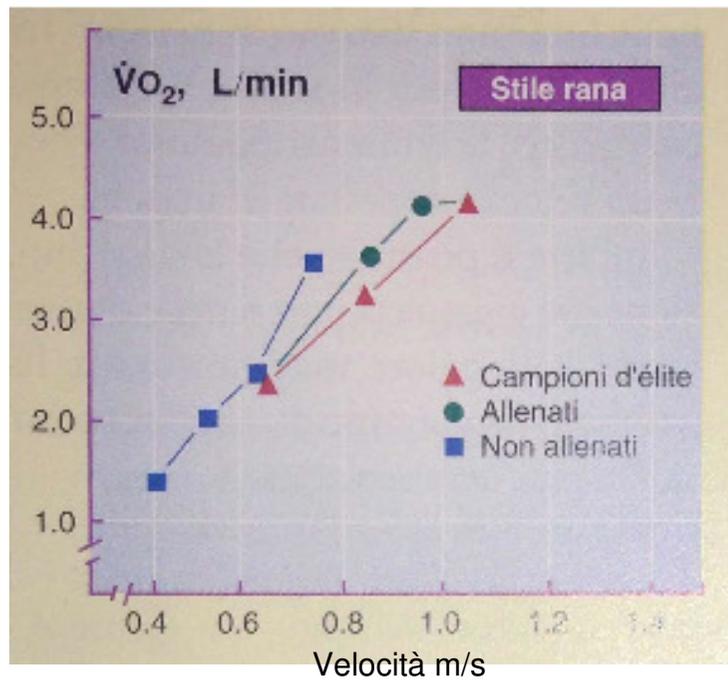
In un gruppo di nuotatori di buon livello di sesso maschile è stato misurato il costo energetico del crawl: 1.04 (SD 0.12) kj/m, alla velocità di 1.42 m/s circa 1270kcal consumate in un'ora di nuoto effettuate costantemente a quella velocità per coprire 5112 metri.

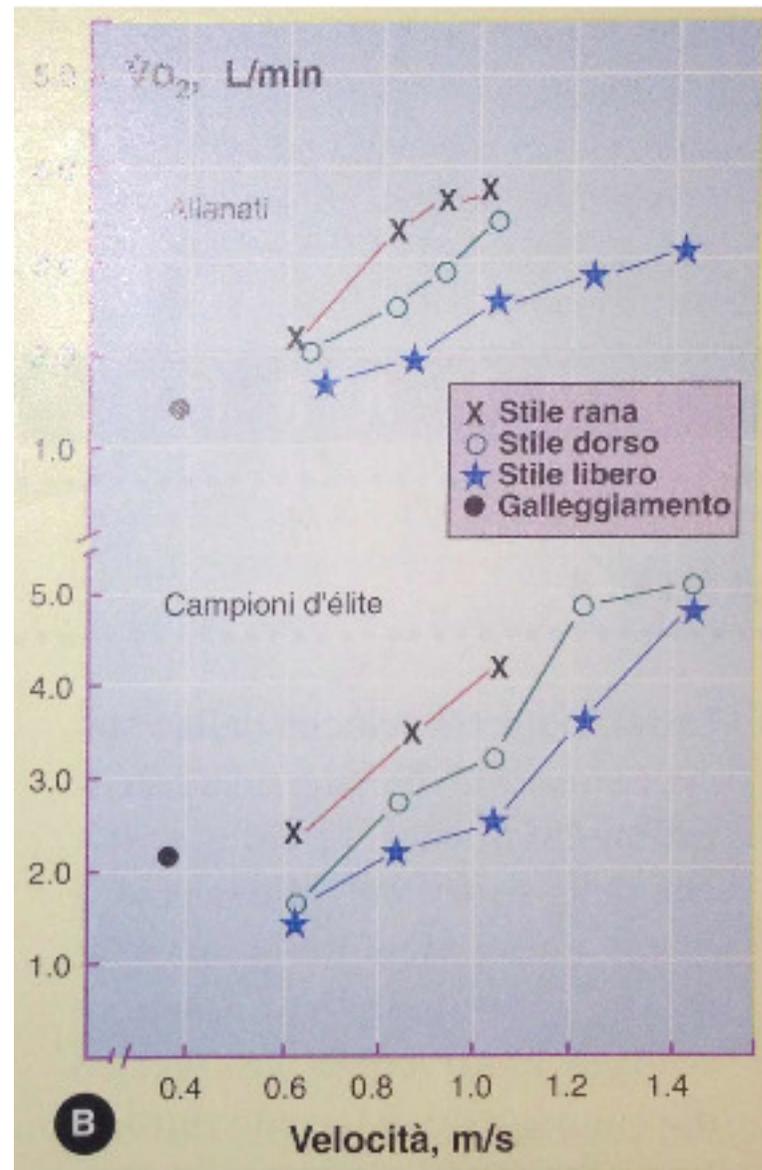
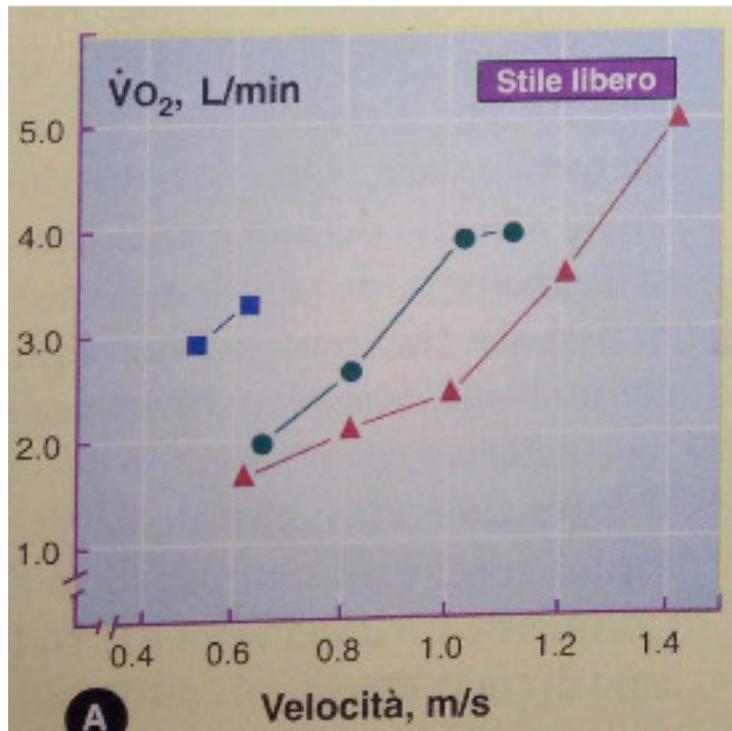
Capelli C, Pendergast DR, Termin B. Energetics of swimming at maximal speeds in humans. Eur J Appl Physiol 1998;78:385-393

Specificity of swim training on maximum oxygen uptake

J. R. Magel , G. F. Foglia , W. D. McArdle , B. Gutin , G. S. Pechar , F. I. Katch

Journal of Applied Physiology Published 1 January 1975 Vol. 38 no. 1, 151-155 DOI:







I nuotatori di alto livello sono in grado di nuotare a una data velocità e a un dato stile con consumo energetico inferiore rispetto a un nuotatore comune

- Il nuotatore d'élite è in grado di mantenere una certa velocità ad un costo energetico minore rispetto ai soggetti più e meno allenati
- Il principale determinante del consumo di Ossigeno è la frequenza cardiaca: correla con la capacità di esercizio
- Il costo energetico varia a seconda dello stile: per tutti lo stile più dispendioso è il delfino, seguito da rana, dorso e stile libero (Holmér I (1974) Energy cost of arm stroke, leg kick and the whole stroke in competitive swimming styles. Eur J Appl Physiol)



Studio di Touretski su 400 nuotatori dimostra come gli atleti di alto livello abbiano grandi performance, in modo inversamente proporzionale alla loro resistenza all'acqua, piuttosto che in modo direttamente proporzionale alla loro espressione di forza.

G.Touretski, parlando di Alexander Popov : *“Un segreto della tecnica stilistica di Alexander Popov è la sua spaventosa efficienza. Le analisi biomeccaniche hanno dimostrato che egli crea meno drag di atleti simili [...]”*

- Una minore resistenza porta al raggiungimento di risultati migliori
- ‘Swimlikeafish’

Costo energetico del nuoto

- Occorre compiere lavoro sia per mantenere il galleggiamento, sia per procedere in un mezzo fluido che offre una resistenza all'avanzamento
- Resistenza molto maggiore rispetto all'aria
- La forza necessaria all'avanzamento dipende da:
 - profilo aerodinamico del soggetto
 - sua superficie frontale
 - velocità
 - caratteristiche fisiche dell'acqua

Minore economia nell'esercizio = maggiore costo energetico

- Il nuoto è la forma di locomozione più lenta
- A parità di distanza il costo energetico del nuoto è quattro volte superiore a quello della corsa
- In acqua vi è la mancanza di appoggi stabili e ciò riduce il rendimento energetico del nuotatore di alto livello al 10% (per lo spostamento in avanti)
- Il 90% rimanente è disperso sottoforma di calore ed è sprecato nello spostamento indietro della mano
- Enorme differenza individuale nella spesa energetica: un nuotatore d'élite spende molto meno di un nuotatore amatoriale

Resistenza all'avanzamento (drag)

- È circa 800 volte superiore a quella dell'aria
- Densità dell'acqua maggiore rispetto all'aria (1205 vs 998.2 Kg/m³)
- In acqua include tre componenti:
 1. Il movimento del nuoto genera onde frontali e vortici in scia al nuotatore (non importante componente del costo energetico a basse velocità, ma lo diventa a velocità elevate)
 1. Resistenza allo scivolamento tra la superficie corporea e l'acqua
 2. Resistenza viscosa all'avanzamento in acqua: la componente principale da vincere
- La differenza di pressione frontale e caudale del nuotatore rappresenta il gradiente pressorio necessario a vincere le resistenze viscosi all'avanzamento.
- Il gradiente è minore nei nuotatori esperti, poiché hanno appreso come mantenere un assetto più idrodinamico

Due componenti della resistenza

- Drag passivo: la resistenza del corpo fermo
- Drag attivo: la resistenza sul corpo del nuotatore in movimento

$$R = K \times V^n \text{ (Newton)}$$

- K dipende da fattori antropometrici
- Correla positivamente con la superficie della sezione trasversa del corpo del nuotatore e negativamente con la sua altezza
- Tendenza all'affondamento arti inferiori
- Tecnica di nuotata (simmetria del gesto, oscillazioni corpo)
- 100-200N alla velocità di gara

Valori teorici di Drag sulla popolazione maschile per prestazioni corrispondenti ai record mondiali sui 100m

- 168N rana
- 175N dorso
- 186N crawl
- 221N delfino

(Capelli et al.1998)

Efficienza di propulsione

=

Lavoro sviluppato per vincere la resistenza dell' acqua all'avanzamento
(Lavoro per vincere la R + Lavoro dissipato per spostare l'acqua)

Nuotatori di alto livello è 0.4-0.6

Basso rendimento energetico

La metà del lavoro esterno effettuato dal nuotatore è realmente efficace per spingere in avanti il corpo.

- Cappaert JM, Bone M, Troup JP. Intensity and performance related differences in propelling and mechanical efficiencies. In:MacLaren D, Reilly T, Lees A (eds) Biomechanics and Medicine in Swimming. Swimming science VI. E&FN Spon, London 1992;49-52.

-Toussaint HM, Hollander AP. Energetics of competitive swimming. Sports Med 1994;18:384-405.

Rendimento energetico

È il rapporto tra lavoro fatto ed energia spesa per compiere il lavoro

$$\begin{aligned}\text{Rendimento} &= \text{Potenza} / \text{Costo energetico} \\ &= \text{Forza frenante} \times \text{velocità} / \text{Costo energetico}\end{aligned}$$

- 20-25% (squalo e delfino)
- Aumenta con la velocità: nuotatori di medio livello crawl 4% velocità 0.6 m/s,
8% velocità 1.9 m/s
- Corsa: 50% alla velocità di 2.8m/s, 70% velocità 9 m/s

Qual è lo stile più economico?

...Dipende

Nuotatori

medio livello

- Crawl
- Dorso
- Rana
- Delfino

Nuotatori

d'élite

- Crawl
- Dorso
- Delfino
- Rana

Table 2 Energy cost of swimming (C_s) in all the subjects and all the strokes measured during the tests in the annular pool at speeds up to maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$). n Number of subjects, Speed *speed* maintained during the swim. At speeds below $\dot{V}O_{2max}$, the standard deviation of the speed (SD) was nil since the subjects swam at the same speed as that imposed by the platform, C_s Gross energy cost of swimming

Stroke	n	Speed ($m \cdot s^{-1}$)		C_s ($kJ \cdot m^{-1}$)	
		Mean	SD	Mean	SD
Crawl	8	0.96		0.75	0.107
		1.14		0.80	0.127
		1.24		0.91	0.164
		1.34		0.99	0.169
		1.42	0.048	1.04	0.116
Backstroke	3	0.86		0.78	0.051
		0.93		0.81	0.117
		1.00		0.84	0.117
		1.07		0.90	0.085
		1.14		0.95	0.025
		1.21		0.99	0.097
Breastroke	6	1.32	0.040	1.09	0.188
		0.79		1.02	0.107
		0.86		1.09	0.112
		0.93		1.16	0.094
		1.00		1.29	0.120
Butterfly	3	1.09	0.084	1.35	0.142
		0.86		0.98	0.069
		0.93		0.90	0.060
		1.00		0.84	0.104
		1.07		0.92	0.089
		1.14		0.96	0.089
		1.27	0.069	1.09	0.104

Come risparmiare le forze?

- Adottare una tecnica di progressione ottimale e cercare di vincere le resistenze
- Grande importanza di:
 - idrodinamicità
 - densità corporea
 - fattori antropometrici (altezza, peso degli arti inferiori)
 - forma del corpo
 - galleggiamento degli arti inferiori
 - tecnica di nuotata (efficienza propulsiva)

Relazione con massa corporea

- Le donne hanno una maggiore massa grassa e minore massa magra rispetto gli uomini
- Muscoli e ossa tendono ad affondare, la massa grassa a galleggiare
- Il costo energetico nelle donne, a parità di velocità di avanzamento, è del 20% inferiore rispetto agli uomini
- Per lo stesso consumo energetico le donne possono tenere una velocità superiore rispetto ai maschi

L'armonia dell'atleta

- La possibilità di utilizzare il costo energetico nello sport come indicatore dello “stile” dell'atleta
- Il soggetto più “economico” ha una migliore armonia di movimento e coordinazione neuromuscolare
- Ipotesi: la misura del costo può fornire indicazioni sulle capacità di prestazione dell'atleta, in quanto a parità di potenza metabolica (consumo di ossigeno), minore risulta il costo e maggiore sarà la potenza meccanica sviluppata (Di Prampero, 1986).

Bilancio energetico

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha definito la richiesta energetica di un individuo in condizioni di composizione corporea, massa e attività fisica volte a garantire uno stato di buona salute, come “il livello di apporto energetico ottenuto con il cibo, in grado di bilanciare il dispendio [...]”.

Il concetto di bilancio energetico come quota calorica necessaria per mantenere costante la dimensione e la composizione corporea, è stato allargato in una versione più moderna e viene inteso come quota necessaria a supportare l'attività fisica giornaliera, a garantire la salute dell'individuo nel lungo termine e a mantenere uno stile di vita compatibile alle attività socialmente ed economicamente desiderabili.

Equilibrio fra introito e dispendio

Bilancio energetico

L'equilibrio esistente tra l'energia immagazzinata e l'energia spesa

Energia in entrata: derivata dagli alimenti

deve essere in equilibrio con l'energia in uscita

- Relativa alle quote per il mantenimento della dimensione corporea, per il ripristino delle componenti tissutali perse, per consentire l'attività fisica, motoria e ricreativa
- Introito calorico < della spesa energetica = perdita di peso
- Introito calorico > della spesa energetica = aumento di peso

L'introito energetico alimentare è costituito da **carboidrati, proteine e grassi**

Energia in uscita: relativa alle perdite

- Comprende le piccole perdite di energia nelle feci (cibi non digeriti, cellule derivate dalla desquamazione delle pareti delle mucose) e nella miscellanea dei tessuti demoliti (capelli, cute, flusso mestruale)

L'introito dei nutrienti deve essere tale da bilanciare le perdite affinché i depositi di energia e la massa corporea rimangano costanti

Apporto energetico adeguato

- Mantenere lo stato di salute
- Mantenere il peso corporeo
- Ottimizzare, negli sportivi, gli effetti dell'allenamento
- Evitare stati di malnutrizione che possono compromettere l'allenamento e successivamente la gara
- La composizione corporea influenza la forza, l'agilità e il rendimento della prestazione

Bibliografia

- Intrinsic factors of the locomotion energy cost during swimming. Fabrizio Caputo, Mariana Fernandes Mendes de Oliveira, Benedito Sérgio Denadai and Camila Coelho Greco. Rev Bras Med Esporte. Vol. 12, No 6 Nov/Dez, 2006.
- Specificity of VO₂MAX and the ventilatory threshold in free swimming and cycle ergometry: comparison between triathletes and swimmers. B Roels, L Schmitt, S Libicz, D Bentley, J-P Richalet, G Millet Br J Sports Med 2005;39:965–968. doi: 10.1136/bjism.2005.020404.
- Metabolic Equivalents (METS) in Exercise Testing, Exercise Prescription, and Evaluation of Functional Capacity. Jette, K. Sidney, G. Blumchen. Clin. Cardiol. 13, 555-565 (1990)
- **Energetics of swimming: a historical perspective P. Zamparo, C. Capelli, D. Pendergast. Eur J Appl Physiol. 2011. 111:367–378 DOI 10.1007/s00421-010-1433-7.**
- Body size, energy metabolism and lifespan. John R. Speakman The Journal of Experimental Biology 208, 1717-1730 Published by The Company of Biologists 2005 doi:10.1242/jeb.01556.
- Frangiolas DD, Rhodes EC. Metabolic responses and mechanisms during water immersion running and exercise. Sport Med 1996;22(1):38-53.
- Farhi LE, Linnarson D. Cardiopulmonary readjustments during graded immersion in water at 35 C. Respir Physiol 1977;30:35-50.
- Hong SK, Cerretelli JC, Cruz C. Mechanics of respiration during submersion in water. J Appl Physiol 1969;27:535-38.

- **Prampero PE di. The energy cost of human locomotion on land and in water. Int J Sports Med 1986;7:55-72.**
- **Capelli C, Pendergast DR, Termin B. Energetics of swimming at maximal speeds in humans. Eur J Appl Physiol 1998;78:385-393.**
- Toussaint HM, Hollander AP. Energetics of competitive swimming. Sports Med 1994;18:384-405.
- Kolmogorov SV, Duplishcheva OA. Active drag, useful mechanical output and hydrodynamic force coefficient in different stroke at maximal velocity. J Biomechanics 1992;3:311-318.
- Cappaert JM, Bone M, Troup JP. Intensity and performance related differences in propelling and mechanical efficiencies. In:MacLaren D, Reilly T, Lees A (eds) Biomechanics and Medicine in Swimming. Swimming science VI. E&FN Spon, London 1992;49-52.
- Hopper RT, Hadley C, Piva M, Bambauer B. Measurement of power delivered to an external weight. In: Biomechanics and Medicine in Swimming, A.P. Hollander, P.A. Huijing,G. de Groot (eds), Human Kinetics, Champaign 1983;113-119.
- Bonifazi M, Sardella F, Lupo C Preparatory versus main competition: differences in performances, lactate responses and pre-competition plasma cortisol concentrations in elite male swimmers. Eur J Appl Physiol 82:368-373, 2000.

