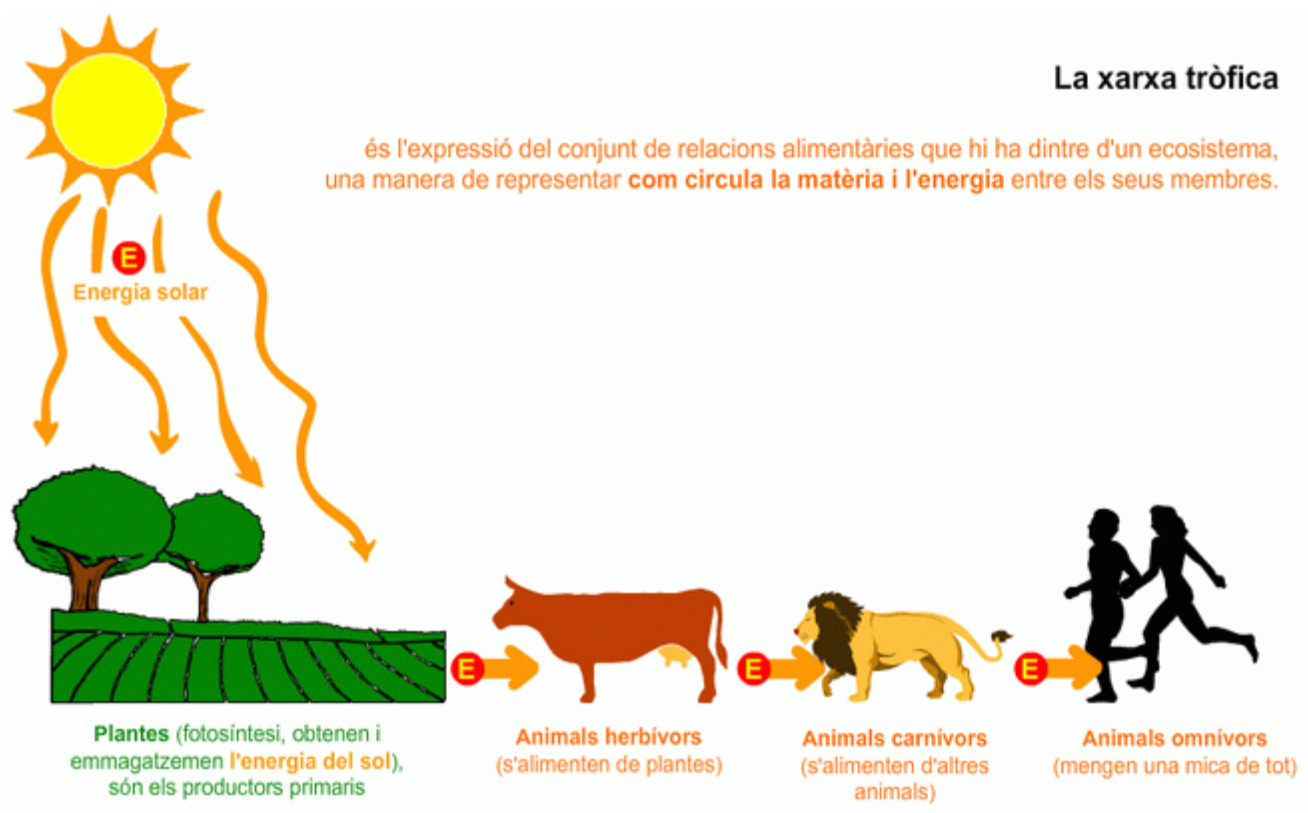


Introducció

Tota activitat física necessita un subministrament d'energia per tal de poder iniciar-la i mantenir-la. El nostre cos funciona de forma similar a qualsevol màquina: realitza un treball transformant l'energia emmagatzemada dins d'un tipus de combustible en energia mecànica (moviment i calor).

El cos humà gaudeix de diferents vies energètiques a nivell fisiològic que s'adeqüen i donen resposta a les nostres necessitats de moviment, necessitats lligades a la supervivència.



Més informació: <http://www.ub.edu/ecologiaiambient/>

Ja coneixeu una de les afirmacions més contundents de la física:
"La energia no es crea ni es destrueix, es transforma".

I de fet, nosaltres som elements energètics, que anem absorbint energia i transformant-la en altres manifestacions energètiques, com és el nostre creixement, el moviment que realitzem o el treball que produïm.

La font d'energia immediata del nostre organisme

El ser humà te com a **única font d'energia immediata i universal l'ATP**

L'ATP o **Trifosfat d'adenosina**, és un conjunt de molècules que emmagatzema **energia química**.

Totes les cèl·lules del nostre organisme, nervioses, secretores, musculars, etc, utilitzen l'energia de l'ATP per les seves funcions.

Energètica de la contracció

La contracció muscular te com a **única font d'energia l'ATP**.

- **ATP - Trifosfat d'adenosina**

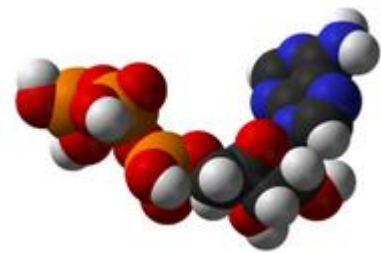
A – Adenosina

T – Tri (de tres)

P – Fosfat (de fòsfor)

També:

- Àcid adenosinatrifosfòric
- Adenosina Trifosfat



Les fibres musculars **només poden aconseguir energia** per la contracció **mitjançant la degradació de l'ATP**.

L'ATP és una molècula (nucleòtid) que assoleix la seva funció energètica amb dues reaccions:

1. Degradant-se, i alliberant l'energia necessària per produir la contracció muscular (procés catabòlic), mitjançant la següent reacció (hidròlisi):




En aquesta reacció que es produeix a nivell de les miofibril·les musculars, l'ATP perd un fòsfor, es transforma en ADP (Bifosfat d'adenosina) i **allibera l'energia necessària per a la contracció**.

2. Regenerar-se de nou, mitjançant una reacció de síntesi que restitueix el fòsfor perdut.

Per dur a terme aquest procés (anabòlic, de síntesi), l'ATP absorbeix energia procedent dels combustibles (glucosa, àcids grassos i proteïnes) que aconseguim en la transformació dels aliments consumits.



<p>L'ATP es troba en quantitats molt petites: ($5 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$), i només permet la contracció de la fibra muscular fins a un màxim de 5 segons.</p> <p>Això implica que en 4 o 5 segons tot l'ATP s'esgoti i ja no puguem mantenir la contracció.</p> <p>L'única manera de repetir i mantenir la contracció muscular és regenerant l'ATP de forma que torni a estar en disposició per alliberar energia de nou.</p> <p>(*El símbol Micro μ és un prefix del Sistema Internacional que indica un factor de 10^{-6}, o $1/1.000.000$)</p>	<p><i>L'ATP actua de forma similar al que seria una pila recarregable. Produïx energia fins que s'esgota, per després tornar-la a recarregar mitjançant l'energia externa provinent de la xarxa elèctrica.</i></p>  <p>En el cas del cos humà, la resíntesi de l'ATP es produirà mitjançant l'energia provinent dels aliments i les diferents vies energètiques que esmentarem tot seguit.</p>
--	---

Vies de subministrament energètic per l'exercici físic

El nostre organisme disposa de **tres vies fonamentals per subministrar energia al múscul**, o el que és el mateix, de regenerar l'ATP.

Les tres vies treballen de forma **conjunta, escalada i coordinada** a l'hora d'aconseguir mantenir un determinat tipus d'activitat.

1. Primera via. Via de subministrament immediat: sistema de l'ATP-PC

El sistema de l'ATP-PC és el mecanisme fisiològic de subministrament energètic que ens permet iniciar un exercici de forma immediata i mantenir-lo fins a **un màxim de 15 segons**. (entre 8 i 15 segons).

2. Segona via. Via a curt termini: sistema anaeròbic.

Aquesta segona via **es posa en marxa aproximadament als 10 segons** d'haver iniciat un exercici intens, coincidint amb l'esgotament energètic de la via ATP-PC. Més enllà dels 10 segons, el sistema anaeròbic garanteix que puguem seguir realitzant un determinat esforç.

3. Tercera via. Via a llarg termini: sistema aeròbic.

El sistema aeròbic comença a ser funcional **aproximadament als 1,5 minuts d'haver iniciat l'esforç**. (90 segons).

Aquesta via és la que ens permet mantenir els esforços de llarga durada com són tots els tipus d'activitat de gran volum: curses a peu, nedar llargues distàncies, ciclisme, etc.

1. Via de subministrament immediat: sistema de l'ATP-PC

- El primer combustible utilitzat per a la contracció muscular és l'ATP.

La reacció és la descrita anteriorment: $ATP \longrightarrow ADP + P + \text{Energia}$

Però la quantitat d'ATP emmagatzemada a la fibra muscular és molt petita, la qual cosa només permet una contracció d'entre 2 a 5 segons.

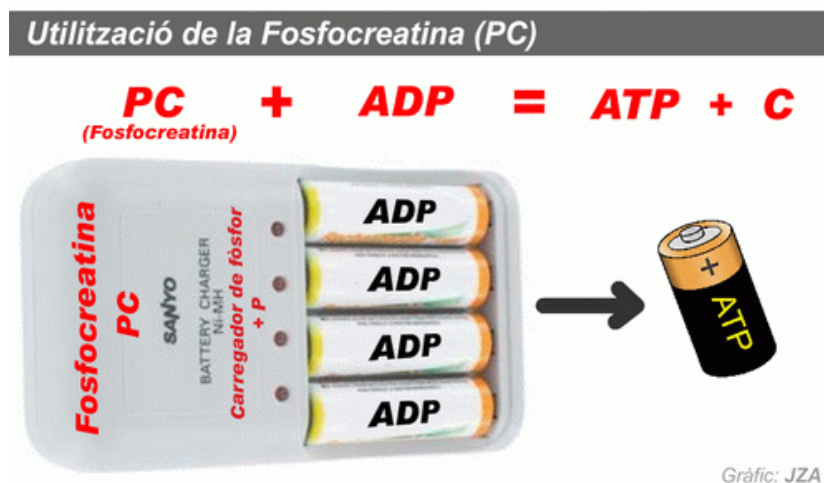
- El segon recurs energètic per mantenir la contracció és la Fosfocreatina (PC)

La Fosfocreatina és present al múscul en una quantitat cinc vegades superior a l'ATP i la seva funció és regenerar les molècules d'ATP perquè tornin a subministrar energia.

La reacció simplificada és: $ADP + PC \longrightarrow ATP + C$

La Fosfocreatina cedeix un enllaç de fòsfor a l'ADP i així es transforma en ATP + Creatina.

Las reserves de PC al múscul també són reduïdes, fet que limita la contracció a un màxim entre 8 i 15 segons.



Mentre la via de subministrament d'energia immediata (ATP-Fosfocreatina) està actuant, el nostre organisme està **posant en funcionament les altres vies energètiques** de curt i llarg termini per tal de poder mantenir el moviment un cop esgotades les possibilitats energètiques de la via ràpida (que, com hem vist, són molt limitades: 15 segons màxim).

2. Via de subministrament a curt termini: sistema Anaeròbic

- El segon recurs energètic es la **glucòlisi anaeròbia**.

És important destacar que, la **glucòlisi anaeròbia** utilitza de forma exclusiva un sol tipus de combustible: la **Glucosa**.

La glucosa la trobem en el cos humà en dues formes:

1. **Glucosa circulant a la sang** (Índex de Glucèmia)
2. **En molècules de glucogen (o glicogen) emmagatzemades als músculs i al fetge**. Les molècules de glucogen són contenidors de glucosa amb la funció de reserva per quant es necessitin. Una sola molècula de glucogen pot contenir més de 120.000 molècules de glucosa.

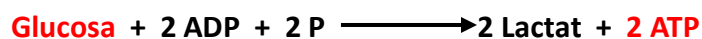
La *glucòlisi anaeròbia* comença un mica abans d'esgotar les reserves d'ATP i PC, al voltant dels 12-15 segons de començat l'exercici.

Aquest mecanisme fisiològic **obté energia degradant la glucosa de l'organisme sense la presència d'oxigen** (d'aquí el nom d'anaeròbia) i la seva funció és assegurar que podem seguir fent exercici un cop esgotades les reserves musculars d'ATP i PC.

Aquest procés es realitza completament en el sarcoplasma (*) i no participa en el *cicle de Krebs* ni en la cadena de respiració mitocondrial.

El procés anaeròbic és poc rendible, ja que **produeix poca energia i forma, com a producte final, àcid làctic (Lactat)**.

La reacció global de la glucòlisi és la següent:

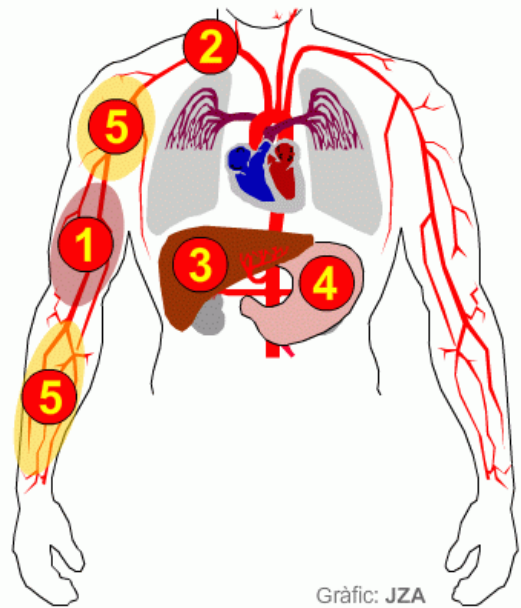


Com podem veure en el procés anaeròbic, **1 molècula de glucosa només produeix 2 ATP**
Pel seu cost energètic, aquest procés no pot mantenir-se indefinidament.

(*) Les miofibril·les musculars estan envoltades d'un fluid intracel·lular anomenat sarcoplasma, que conté ATP, PC, enzims, proteïnes, mioglobina, lípids, minerals, etc.

Origens de la GLUCOSA utilitzada per la fibra muscular

- 1** Múscul ACTIU. És produïx la Glucogenòlisi muscular. El múscul mobilitza les seves reserves de Glicogen muscular per produir Glucosa com a combustible.
- 2** Un cop esgotades les reserves de Glicogen muscular, el múscul incorpora la Glucosa circulant en sang. (Glucèmia: nivell de glucosa en el plasma sanguini)
- 3** En el FETGE, la Glucogenòlisi hepàtica converteix les reserves de Glicogen hepàtic en Glucosa i les allibera al torrent sanguini.
- 4** Els Glúcids de la dieta s'incorporen al torrent sanguini després de la transformació de la digestió.
- 5** Les reserves de Glicogen muscular dels músculs inactius no es mobilitzen ni passen al torrent sanguini. Només s'utilitzen per a la seva contracció.



3. Via de subministrament a llarg termini: sistema Aeròbic

- El tercer recurs energètic es la **glucòlisi aeròbia**

La via d'oxidació aeròbia utilitza majoritàriament dos tipus de combustible:

1. **Glucosa**
2. **Àcids grassos lliures** (AGL)

El procés d'oxidació aeròbia és una successió de reaccions químiques a nivell cel·lular que s'anomena "*Cicle de Krebs*".

El **Cicle de Krebs** realitza l'oxidació dels hidrats de carboni, àcids grassos (i també pot oxidar aminoàcids si cal) alliberant energia en forma utilitzable. És un procés energèticament molt rendible i **que utilitza O₂ per a la reacció, d'aquí el terme: aeròbia**.

Però, aquesta via metabòlica de subministrament d'energia és **lenta a l'hora de posar-se en marxa**. Comença al voltant dels 30" i no es troba totalment operativa fins passats un minut i mig del començament de l'exercici.

El procés aeròbic va substituint gradualment el procés anaeròbic fins assolir la seva total funcionalitat al minut i mig, com ja hem comentat.

El balanç total de l'oxidació aeròbia és:



Així doncs, podem observar la **alta rendibilitat del la via aeròbia**, on cada molècula de glucosa permet regenerar **38 ATP** (en comparació dels 2 ATP de la via anaeròbia).

Els àcids grassos només poden ser oxidats per la via aeròbia i la seva rendibilitat és altíssima: **1 molècula d'àcids grassos regenera 129 molècules d'ATP**.

- Un gram de hidrats de carboni (glucosa) proporciona 4 Kcalories
- Un gram de greix (àcids grassos) proporciona 9 Kcalories.
- Un gram de proteïnes proporciona 4 Kcalories

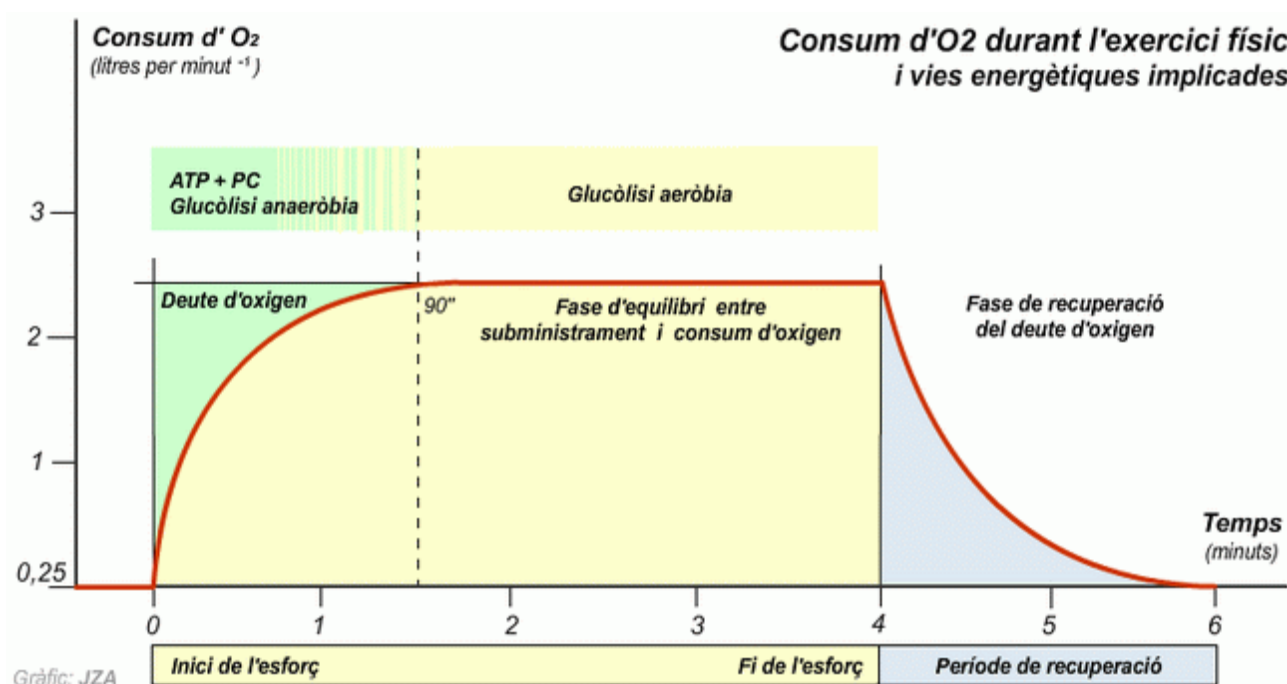
Concepte de deute d'oxigen

El deute d'oxigen es defineix com la quantitat d'oxigen consumit durant la fase de recuperació després d'haver realitzat un exercici físic intens. Un consum superior al que tenim en estat de repòs.

- Durant la primera fase d'un exercici físic intens, el nostre cos utilitza la via anaeròbica (combustió sense presència d'O₂), i durant aquesta fase **anem acumulant un deute d'oxigen**.
- Quan la via aeròbica (combustió amb presència d'O₂) ha estat inicialitzada del tot, el nostre organisme entra en una **fase d'equilibri** entre el consum d'O₂ i la nostra capacitat de subministrament d'O₂.
- Un cop ens aturem, s'inicia una fase de recuperació en la qual el nostre organisme **recupera el deute d'O₂** generat durant la fase anaeròbica.

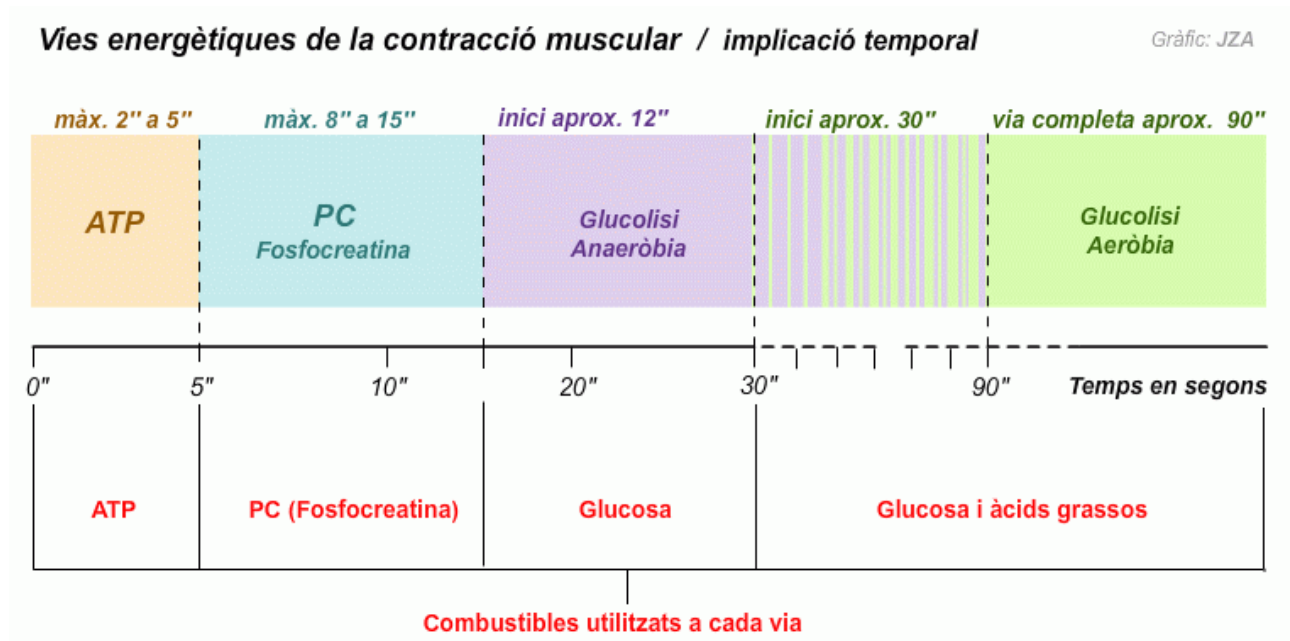
Aquesta és la causa per la qual, un cop hem finalitzat un esforç, el nostre sistema respiratori segueix treballant accelerat durant uns minuts més (el nostre ritme respiratori segueix sent elevat, respirant intensament com si encara estiguéssim fent un esforç).

Aquesta gràfica reflecteix de forma visual aquest procés.



Coordinació temporal de les vies energètiques i combustibles durant l'exercici

Com a resum del que hem vist fins ara, aquí tenim una visió global de tot el procés energètic associat a la contracció muscular.

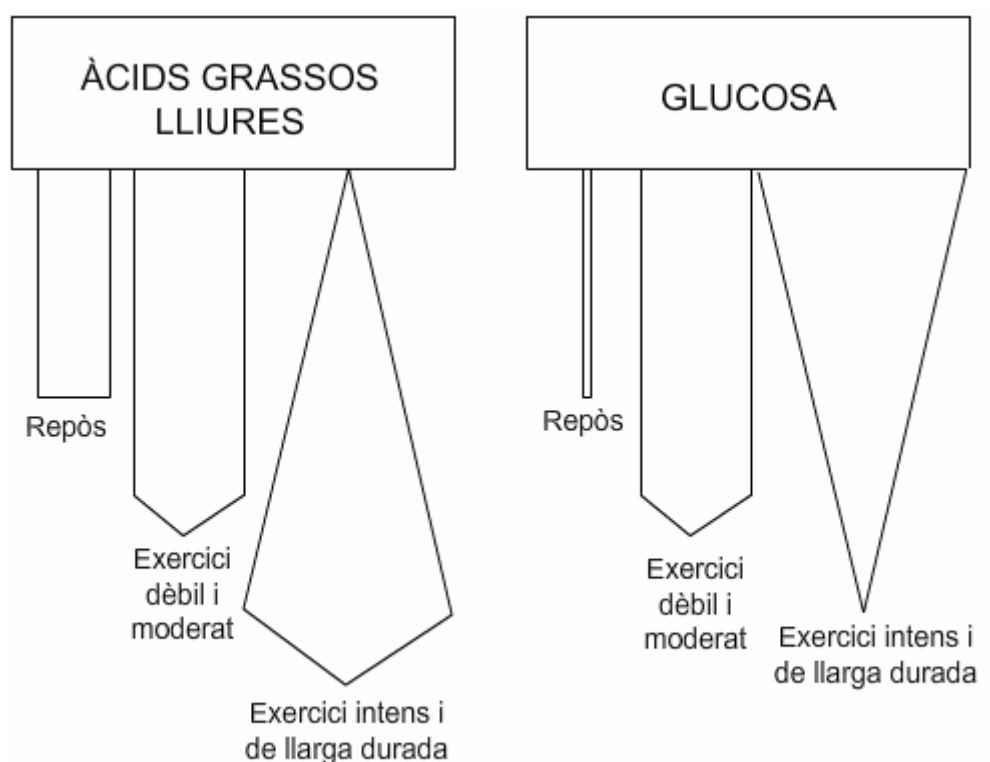


1. El primer combustible que utilitzem és l'ATP, només operatiu durant 2-5 segons.
2. El segon combustible és la Fosfocreatina (PC) que regenera l'ATP. La seva funcionalitat no va més enllà dels 15 segons després d'iniciada la contracció.
3. El tercer combustible és la glucosa emmagatzemada en el cos, consumit per la via anaeròbia, que es posa en marxa a partir dels 15 segons. Permet mantenir la contracció mentre va donant temps perquè s'inicialitzi la via aeròbia.
4. La via aeròbia consumeix glucosa i àcids grassos, posant-se en marxa al voltant dels 30 segons de manera gradual per arribar a la seva funcionalitat total al voltant del minut i mig.

Combustibles utilitzats pel múscul en relació a l'activitat de la persona

Els combustibles utilitzats pel múscul són fonamentalment dos: **glucosa** i **àcids grassos**.

- **En estat de repòs:**
Utilitzem de forma essencial els àcids grassos lliures (AGL). Això és així perquè el cos humà cerca la màxima eficiència i el combustible més rendible energèticament són els AGL
- **Executant un exercici poc intens o moderat:**
S'utilitzen per igual àcids grassos i glucosa.
- **Executant un exercici intens i de llarga durada:**
En primer lloc la font d'energia s'aconsegueix majoritàriament de la glucosa.
Si mantenim l'esforç durant un temps perllongat, les reserves de glucosa corporal es van esgotant i comencen a ser substituïdes pels àcids grassos.
Així que, al final, pràcticament tota l'energia s'aconsegueix de l'oxidació d'AGL (el cos mobilitza les seves reserves de greix corporal).



Gràfic: BARBANY CAIRÓ, JR. Fundamentos de fisiología del ejercicio y del entrenamiento

(Nota 1) Altres fonts energètiques podrien ser els aminoàcids (proteïnes) però només s'utilitzen en cas de necessitat, com seria la inanició severa i perllongada. En condicions normals no superen el 5% de les necessitats energètiques.

(Nota 2) Alguns tipus de cèl·lules, com les neurones i el múscul cardíac, utilitzen fonamentalment glucosa com a font d'energia.

L'àcid làctic

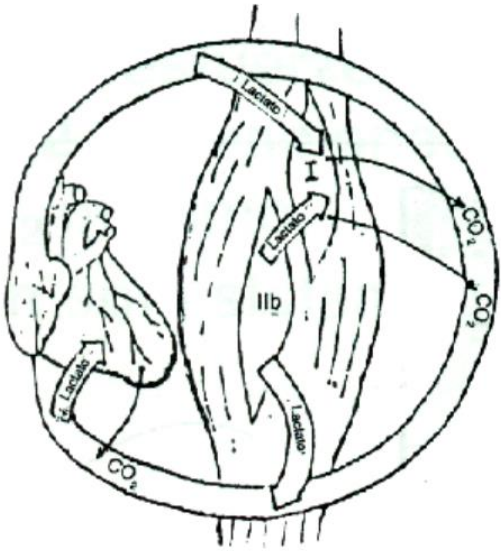
Quan realitzem exercici d'alta intensitat que involucra el metabolisme anaeròbic es genera una gran quantitat d'àcid làctic com a conseqüència del procés .

Sobre la presència i acumulació d'àcid làctic en el cos cal aclarir el següent:

1. **No és responsable** de la sensació muscular de "cremar-se" quan ens exercitem amb molt alta intensitat.
2. **No és responsable** dels cruiximents ("agulletes") que s'experimenten a les 24 hores posteriors d'haver realitzat un exercici molt intens i que poden durar fins a una setmana.
3. **No es una producte de desfeta**

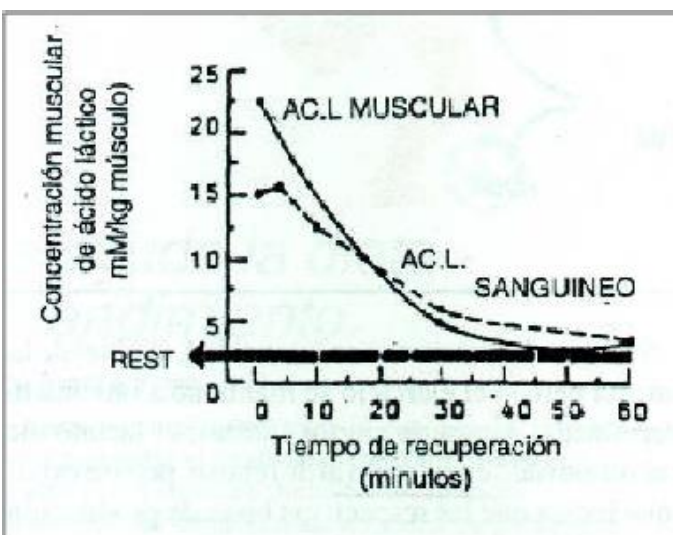
L'àcid làctic és produït pel cos durant tot el dia i existeixen mecanismes metabòlics que regulen la seva presència a la sang i músculs. Quan l'exercici físic intens sobrepassa la tasa d'àcid làctic normal aquest s'elimina per diverses vies metabòliques.

Del lactat produït durant l'exercici anaeròbic: (per fibres glicolítiques anaeròbiques *Tipus II b*)



- **el 50% s'acumula i és oxidat dins del propi múscul** per altres fibres musculars (fibres lentes aeròbiques: *Tipus I*, fibres ràpides semi oxidatives *Tipus II a*) alliberant CO₂ a la sang venosa.
- **L'altre 50% passa al torrent sanguini** mitjançant el qual
 - Arriba el cor on és utilitzat com a combustible del múscul cardíac.
 - Arriba a altres músculs necessitats de substrats energètics.
 - Arriba al fetge on es transforma de nou en Glucosa i glicogen mitjançant el **Cicle de Cori** (veure l'ANNEX)

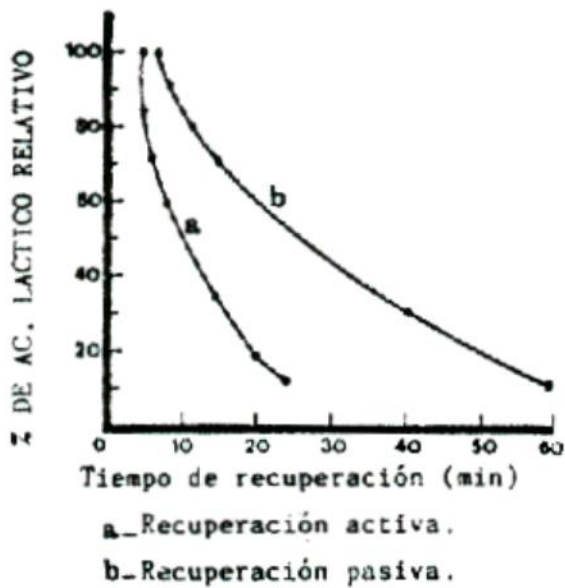
Lactate Shuttle muscular i intravascular



Tot l'àcid làctic acumulat en el nostre organisme és reciclat en un període no superior a 1 hora

Per la qual cosa és evident que no pot ser el causant dels cruiximents que apareixen 24 hores després.

A més s'ha constatat que persones amb malalties en que no poden generar àcid làctic també presenten cruiximents.

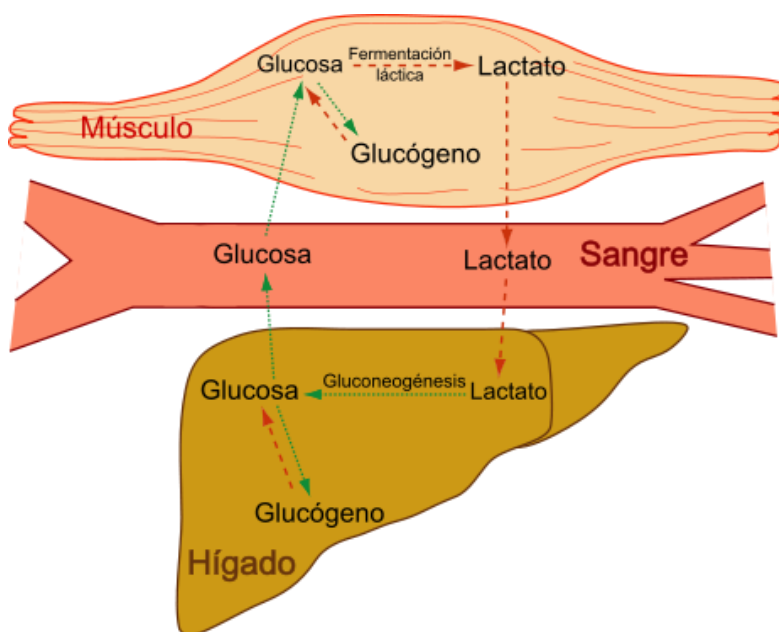


L'activitat física a ritme suau és activadora del procés de reconversió del lactat residual

Aquí podeu veure com mitjançant un exercici moderat es redueix el temps d'eliminació d'acid làctic a uns 25 minuts respecte als 60 d'una recuperació passiva. (descansar, no fer res)

ANNEX: El cicle de CORI

Durant el treball anaeròbic es produeix una gran quantitat d'acid làctic (lactat) que va a parar al torrent sanguini. Aquest producte és reciclat mitjançant un procés de transformació realitzat en el fetge anomenat **Cicle de Cori**.



El lactat en el fetge és transformat de nou en glucosa per la gluconeogénesi i retornat a la circulació sanguínia cap al múscul.

I aquesta glucosa regenera les reserves de glicogen, tant muscular com hepàtic.

El procés va ser descrit en el 1929 por Gerti y Carl Cori, premis Nobel de Medicina y Fisiología, 1947

Esquema del Cicle de Cori. Les **fletxes en vermell** mostren el sentit de les reaccions metabòliques que es produeixen en el cicle en un estat d'esforç físic. Les **verdes** indiquen les reaccions que es produeixen en estat de repòs.

Font de la imatge: Viquipedia castellà. http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Cori

Bibliografía

BARBANY CAIRÓ, J R. Fundamentos de fisiología del ejercicio y del entrenamiento. Barcelona. Edit. Barcanova 1990.

MC ARDLE W, KATCH F, KATCH V. Fisiología del ejercicio. Energía, nutrición y rendimiento humano. Madrid. Edit. Alianza Editorial 1990

LACOSTE C, RICHARD D. El ejercicio muscular. Adaptación fisiológica del organismo al esfuerzo. Barcelona. Edit Paidotribo 1995

BOWERS R, FOX E. Fisiología del deporte. Buenos Aires. Edit. Médica Panamericana 1995

LAMB, DAVID R. Fisiología del ejercicio. Respuestas y adaptaciones. New York. Edit. Macmillan Publishing 1978. E. Pila Teleña. Madrid. 1985

MAZZA, JUAN CARLOS. Ácido Láctico y Ejercicio. Actualización en Ciencia del Deporte. Vol. 5, Nro 14, 1997.

CHICHARRO JL, FERNANDEZ A. Fisiología del Ejercicio. Editorial Panamericana. 3a edición 2006. Buenos Aires

Jordi Zaragoza Anglès (2009)