

8

Sistemas energéticos en el ejercicio

8.1. UTILIZACIÓN DE ENERGÍA POR EL MÚSCULO

8.1.1. Combustible energético para la contracción muscular

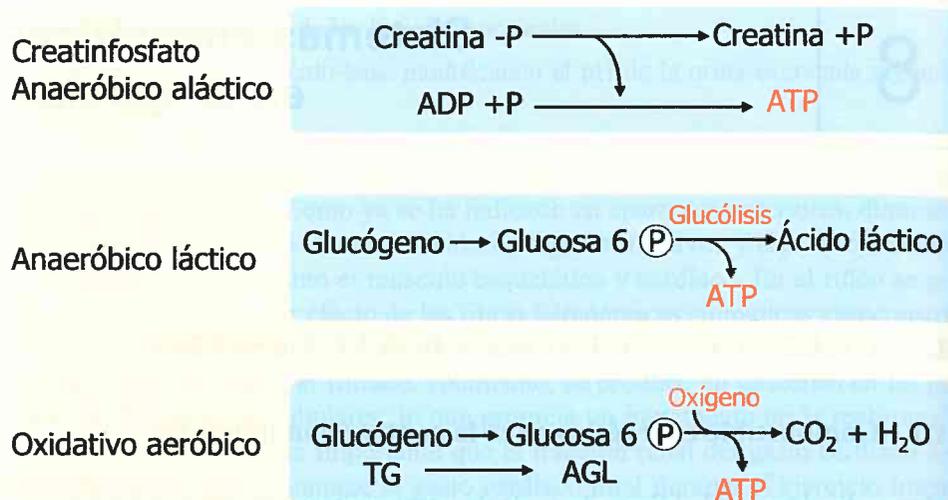
El desarrollo de actividad física depende de un suministro energético adecuado a las fibras musculares responsables del proceso de contracción. Esta energía proviene de las moléculas de adenosín trifosfato (ATP), un nucleótido que se incluye dentro de los compuestos fosfato de alta energía, así llamados porque en sus enlaces fosfato se concentra gran cantidad de energía que puede liberarse por reacciones de hidrólisis simple y/o de transferencia de fosfatos.



Sin embargo, al igual que una batería de coche, que contiene una cantidad limitada de energía, la concentración de ATP en el interior de las células se sitúa en torno a 5-6 μmoles por gramo de fibra muscular, cantidad muy escasa que sólo aporta energía para contracciones intensas durante 2-4 segundos. Para poder mantener la actividad muscular, exceptuando los primeros segundos, es necesario que se vaya formando continuamente nuevo ATP. Esto es posible gracias a la ruptura de moléculas más complejas (nutrientes) por medio de diferentes series de reacciones químicas, que liberando energía permiten la resíntesis citada.

Los sustratos energéticos de la fibra muscular esquelética son los mismos que los de cualquier otra célula, es decir, los nutrientes hidratos de carbono, grasa y proteína y además el creatinfosfato.

Tanto la **Figura 8.1** como la **Figura 8.2** muestran los distintos sistemas que permiten obtener el ATP a partir de estas moléculas, los cuales se citan a continuación.



AGL: ácidos grasos libres.

Figura 8.1. Sistemas energéticos en el ejercicio.

a) Creatinfosfato muscular

El creatinfosfato o fosfocreatina (PCr) es un compuesto energético almacenado en músculo, de utilización inmediata, que se constituye como una reserva primaria de energía ya que se encuentra en concentraciones 5-6 veces mayor que el ATP (25-50 μmoles por gramo de músculo). Su concentración está en equilibrio con la de ATP, y permite obtener rápidamente éste mediante la fosforilación del ADP presente, sin necesidad de oxígeno. Es decir, la energía del PCr se cede al ATP y éste es el que finalmente permite la contracción muscular.



La utilización de la fosfocreatina está limitada por su escasa concentración y por la pequeña cantidad de ATP que genera, que puede ser de 0,6 moles en el hombre y 0,3 moles en la mujer, lo que expresado en kcal supone 4,56 y 2,28 respectivamente. Resulta evidente que este sistema presenta una baja rentabilidad energética y que sólo puede suministrar energía durante muy poco tiempo (actividades explosivas de 5-10 seg). Durante los primeros segundos de una actividad muscular intensa, tal como un *sprint*, el ATP se mantiene a un nivel relativamente constante, pero la concentración de PCr disminuye rápidamente (Figura 8.2). Sin embargo, al llegar al agotamiento, tanto ATP como PCr presentan niveles muy bajos y son incapaces de suministrar la energía para contracciones musculares adicionales. La recarga de

creatina (Cr) para formar de nuevo PCr sólo se hace a partir de ATP neoformado, por lo que la célula debe de poseer dicha disponibilidad metabólica (energía o ATP procedente del combustible alimentario) o estar en recuperación o relajación muscular.

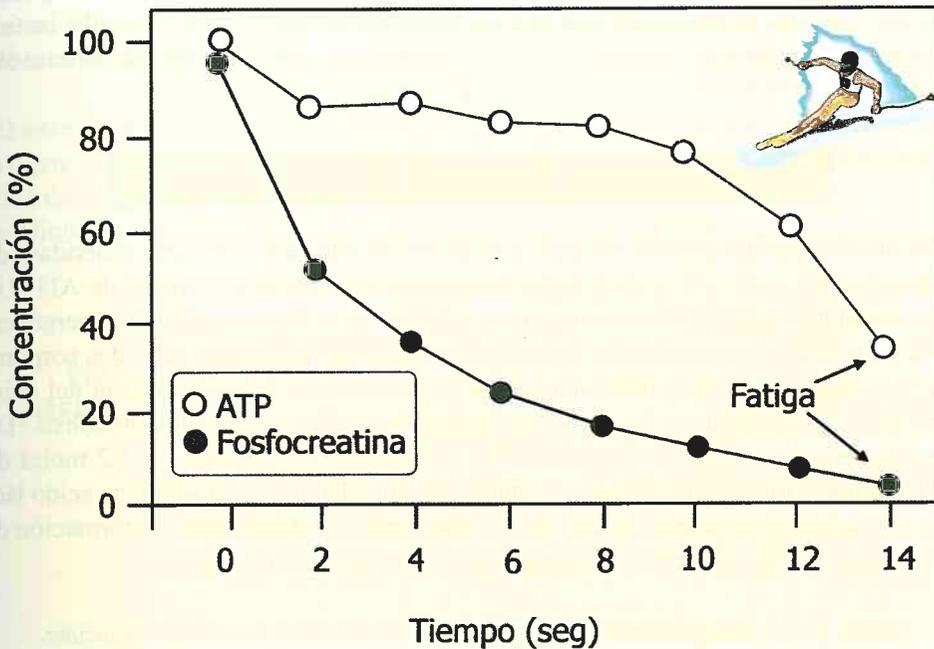


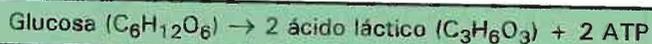
Figura 8.2. Cambios en el ATP y el creatinfosfato del músculo durante los primeros segundos de un esfuerzo muscular máximo. (Adaptado de Wilmore y Costill, 1994).

Si se pedalea en cicloergómetro con cargas fuertes que no se soportan más allá de 1 ó 2 min, puede observarse cómo a los 10 seg se ha consumido el 40% de la fosfocreatina, un 50% a los 20 seg y un 70% a los 60 seg, dándose una relación lineal entre el porcentaje de utilización de la fosfocreatina y la intensidad del ejercicio. En los periodos de descanso existentes entre actividades máximas y explosivas repetidas, se recargan las reservas de fosfocreatina a expensas principalmente de la resíntesis de ATP. Un hecho importante a destacar es que el entrenamiento específico puede incrementar las reservas musculares de fosfocreatina.

Al conjunto creatinfosfato-ATP se le denomina sistema del fosfágeno o también sistema anaeróbico aláctico, dado que la utilización de la fosfocreatina implica una resíntesis de ATP mediante reacciones en las que no interviene el oxígeno y no produce productos de desecho tales como el ácido láctico.

b) Sistema del ácido láctico

El sistema del ácido láctico, también denominado anaeróbico láctico, permite un suministro rápido de energía, aunque menor que el del fosfágeno mencionado anteriormente, y asimismo no depende de oxígeno (véase **Capítulo 2**). Utiliza como sustrato energético el glucógeno muscular, que mediante la glucogenolisis pasa a glucosa, la cual es metabolizada por vía anaeróbica conduciendo a ácido láctico (glucólisis anaeróbica) (**Figuras 2.8 y 3.3, Capítulos 2 y 3**). Este sistema permite obtener ATP por el proceso denominado fosforilación a nivel de sustrato.



Esta vía metabólica pone la energía a disposición muscular con gran celeridad, de forma que por cada 180 g de glucógeno pueden resintetizarse 3 moles de ATP. Un inconveniente de este sistema energético, además de su baja rentabilidad energética, es la generación y acumulación de ácido láctico en los músculos y líquidos corporales. La reducción del pH muscular afecta negativamente a la contracción del músculo y a la actividad de las enzimas implicadas en la propia glucogenolisis. De hecho, durante el ejercicio la producción útil de ATP es sólo de 1 a 1,2 moles de ATP, debido a que los músculos y la sangre sólo pueden tolerar 60-70 g de ácido láctico (producto resultante) y la tasa de producción de ATP supondría la formación de 180 g de ácido láctico, cifra peligrosa para el funcionamiento orgánico.

Tabla 8.1. Características de los sistemas de provisión energética muscular.

CARACTERÍSTICAS	SISTEMA DEL FOSFÁGENO	SISTEMA DEL ÁCIDO LÁCTICO	SISTEMA OXIDATIVO
Metabolismo	Anaeróbico.	Anaeróbico.	Aeróbico.
Metabolitos de desecho		Ácido láctico.	CO ₂ y H ₂ O
Velocidad de implantación	Muy rápido.	Rápido.	Lento.
Sustrato energético	Creatinfosfato.	Glucógeno.	Glucógeno, grasa y proteínas.
Capacidad energética (moles ATP)	0,6	1,2	Ilimitada.
Modalidad deportiva	Alta potencia. Mínima duración.	Alta potencia. Duración corta.	Prolongadas o de resistencia.
Velocidad de provisión de energía (moles ATP/min)	3,6	1,6	1

FUENTE: Mataix y González Gallego, 2002.

c) Sistema oxidativo o aeróbico

Mediante el sistema aeróbico u oxidativo (véase **Capítulos 2 y 3**), que implica la utilización de oxígeno como su nombre indica, se pueden metabolizar además de hidratos de carbono (glucólisis aeróbica), grasa y proteína (e incluso alcohol cuando esté presente), que como es conocido rinden finalmente CO_2 y H_2O en los cuatro casos, y además urea cuando se metaboliza proteína. Este sistema es altamente rentable desde el punto de vista energético.

El sistema aeróbico es un mecanismo de provisión energética lenta, que depende de oxígeno. Lo más destacable de él es su gran capacidad de aporte energético, en función de las grandes reservas de substratos oxidables, especialmente grasa, y del alto rendimiento del sistema aeróbico, tal como se acaba de indicar.

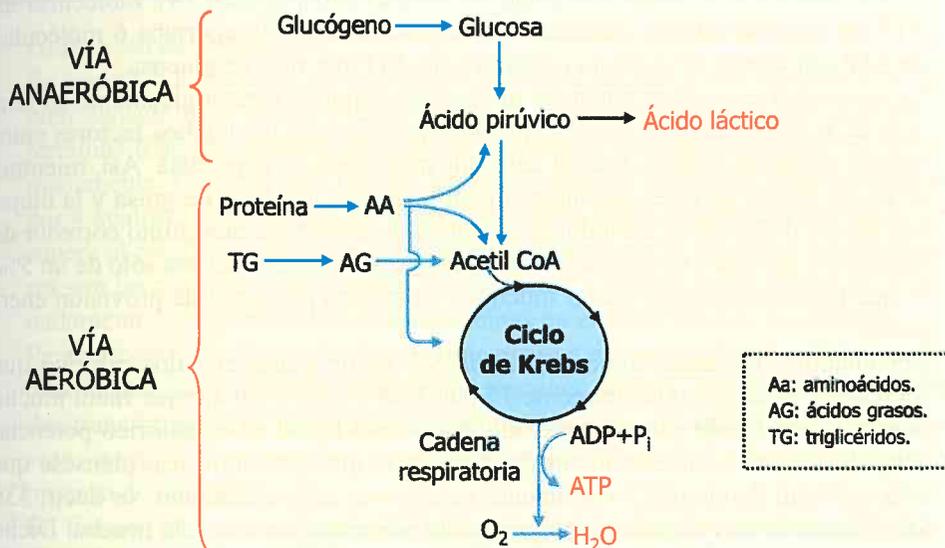
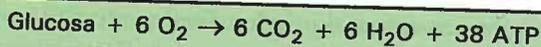


Figura 8.3. Utilización del combustible energético mediante el sistema anaeróbico láctico y el sistema aeróbico.

- *Utilización de la glucosa*

La utilización de la glucosa en la vía oxidativa aeróbica (fosforilación oxidativa) supone la combustión completa mitocondrial mediante la participación de sus intermediarios metabólicos en el ciclo de Krebs y la transferencia de sus electrones por la cadena respiratoria hasta el aceptor final (oxígeno) (Figuras 2.8, 2.9 y 8.3). El proceso conlleva la degradación hasta CO_2 y H_2O (subproductos que, a diferencia del ácido láctico no modifican el pH y no ocasionan fatiga alguna) y

producen 38 ATP por mol de glucosa (es decir, es 19 veces más rentable que la vía anaeróbica). La capacidad energética potencial de los depósitos de glucógeno por esta vía es de 1.055 kcal, partiendo de aproximadamente 270 g de glucógeno muscular (Tabla 8.2).



- *Utilización de la grasa*

Por lo que se refiere a la grasa, los ácidos grasos, bien almacenados como triglicéridos intramusculares o bien procedentes de la sangre circulante, entran en la vía metabólica de la β -oxidación mitocondrial, que conlleva la producción de unidades de acetilCo-A y su entrada en el ciclo de Krebs (Figura 8.3). Pueden llegar a producirse 9 moléculas de ATP por cada átomo de carbono que integre el ácido graso (el ácido palmítico, de 16 carbonos, genera 130 moléculas de ATP en su combustión o el ácido esteárico, de 18 carbonos, genera 147 moléculas de ATP en su combustión), mientras que la glucosa tan sólo aportaba 6 moléculas de ATP por átomo de carbono oxidado o 38 ATP por mol de glucosa.

La capacidad energética potencial de la grasa corporal varía lógicamente en función de la cantidad de la misma, que a su vez depende de muchos factores entre los que destacan el sexo, y en el caso que nos ocupa, el deportista. Así, mientras se puede hablar de que un hombre medio posee un 15–18% de grasa y la mujer una media de 25–28%, cuando se considera un deportista masculino corredor de resistencia (grandes distancias), la cantidad de grasa puede ser tan sólo de un 5%, lo que lógicamente hace variar mucho la capacidad potencial de provisión energética.

Por ejemplo, tomando como referencia 8,4 kg de grasa, el valor calórico que representa es de aproximadamente 75.000 kcal (Tabla 8.2); aunque fuera mucho menor, como puede ser un contenido graso de 3 kg, el valor calórico potencial sería de 27.000 kcal. Con el fin de destacar lo que esto significa, piénsese que esta cantidad de energía es suficiente para correr ocho maratones, es decir, 336 km, distancia muy superior a la que puede recorrerse en una sola prueba. Dicho de otra manera, la capacidad potencial de la grasa corporal, supera con mucho la capacidad física del ejercicio en ejecución continua, sobreviniendo la fatiga mucho antes de agotarse los depósitos de grasa.

Al hablar de fuente energética grasa, se incluye no sólo la del depósito adiposo, movilizado a sangre en forma de ácidos grasos que alcanzan el músculo para ser metabolizados, sino los propios triglicéridos musculares y los ácidos grasos sanguíneos, dependiendo la contribución porcentual de cada uno a la intensidad del ejercicio, tiempo de práctica del mismo, repetición de pruebas, etc. Así, por ejemplo, en ejercicio aeróbico intenso el papel de los triglicéridos musculares es fundamental, mientras que cuando es ligero tienen una gran importancia los ácidos grasos provenientes de la lipólisis adiposa. Estos aspectos se tratarán con más detalle en el capítulo dedicado a lípidos y ejercicio.

Tabla 8.2. *Reservas energéticas en una persona de 70 kg y un 12% de grasa corporal.*
(Adaptado de Mataix y González Gallego, 2002).

SUBSTRATO	CANTIDAD (g)	CONCENTRACIÓN (mg/kg)	ENERGÍA (kcal)
Glucógeno muscular	270-400	80-200	1.025-1.555
Glucógeno hepático	80-100	300-500	358-598
Glucosa sanguínea	30		76,5
Triglicéridos del tejido adiposo	8.400		75.247
Triglicéridos musculares	50-80		478-717
Ácidos grasos en sangre	0,3-0,6		

- *Utilización de la proteína*

En cuanto a la proteína, su capacidad potencial de provisión energética es también elevada pero mucho menor que la de la grasa. Aunque puede hablarse en términos teóricos, teniendo en cuenta la proteína máxima utilizable, de aproximadamente 12.000 kcal (3 kg de proteína corporal utilizable metabólicamente por 4 kcal/g), la utilización de la proteína como fuente energética es escasa y no supera el 5% de los requerimientos energéticos celulares. Además, cuanto mayores son las reservas orgánicas de carbohidratos y lípidos, tanto menor es,afortunadamente, la participación de las proteínas en el metabolismo energético.

Para su contribución como combustible energético algunos aminoácidos pueden transformarse en glucosa mediante la gluconeogénesis. Alternativamente, pueden transformarse en intermediarios del metabolismo oxidativo, tales como piruvato, acetil CoA y diversos intermediarios del ciclo de Krebs, entrando en el proceso de oxidación.

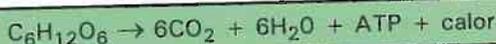
En función de lo que se acaba de indicar la metabolización aeróbica de hidratos de carbono, grasa y proteína es capaz de cubrir con mucho las exigencias energéticas de cualquier modalidad deportiva. Como es fácil de suponer, la implantación de uno u otro sistema depende no sólo de su velocidad metabólica, capaz de suministrar ATP en el momento que se necesite, sino también de la capacidad de irrigación muscular con el adecuado aporte de oxígeno.

8.1.2. Cociente respiratorio y liberación de energía

El cociente respiratorio (CR) es la relación entre el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono. Este índice permite valorar el sustrato energético utilizado para la resíntesis del ATP.

a) Utilización de hidratos de carbono

La combustión aeróbica de los hidratos de carbono da lugar al consumo de 6 moles de O_2 y a la producción de 6 moles de CO_2 . Si sólo se utilizan hidratos de carbono como fuente energética, el cociente respiratorio será de $6 CO_2/6 O_2 = 1$.



Por otra parte, se puede calcular el número de calorías liberadas al producir la combustión de un litro de oxígeno conjuntamente con hidratos de carbono. Un mol de glucosa (180 g) libera 686 kcal (el valor calórico de 1 g de hidratos de carbono es 4 kcal) y utiliza 135 l de O_2 (cada mol de oxígeno equivale a 22,5 l). El equivalente calórico de cada litro de O_2 será, por tanto, de $686/135 = 5,05$ kcal. Es decir, un litro de O_2 utilizado en la combustión de los hidratos de carbono liberará unas 5,05 kcal.

b) Utilización de los lípidos

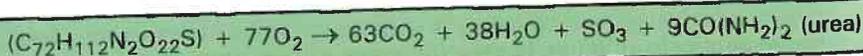
Los lípidos producen menos CO_2 en relación al VO_2 . Por ejemplo, en la combustión de un mol de ácido palmítico se generan 16 moles de CO_2 y se utilizan 23 moles de O_2 . El cociente respiratorio será en este caso de $16 CO_2/23 O_2 = 0,7$.

Un mol de ácido palmítico (256 g) libera 2.445 kcal (el valor calórico de 1 g de ácidos grasos es de 9 kcal) y requiere 517 l de O_2 . Esto quiere decir que cada litro de O_2 utilizado para la combustión de los lípidos dará $2.445/517 = 4,7$ kcal. Los lípidos necesitan más oxígeno para liberar la energía que contienen y son, por lo tanto, menos rentables que los hidratos de carbono. No obstante, tienen otras ventajas, como su mayor valor calórico o el hecho de que no retienen agua.

c) Utilización de proteínas

Las proteínas no se degradan totalmente en el organismo, y una parte, el grupo amino, se elimina por el riñón en forma de urea. Se puede saber la cantidad de proteínas degradadas si se mide la cantidad de nitrógeno (urea) de la orina, aunque, desgraciadamente, durante la actividad física también aumenta la liberación de urea por el sudor.

Para una proteína como la albúmina:



El valor del cociente respiratorio será, por tanto, de $63 O_2/77 O_2 = 0,82$

Un mol de albúmina libera 2.277 kcal y requiere 495 l de O₂. Por tanto, cada litro de oxígeno utilizado para la combustión de proteínas libera 4,6 kcal.

Tabla 8.3. Relación entre el cociente respiratorio (CR) y las proporciones de carbohidratos y grasa utilizados en la producción de energía.
(Adaptado de Mataix y González Gallego, 2002).

CR	% DE O ₂ CONSUMIDO EN EL METABOLISMO DE		% DE ENERGÍA PRODUCIDA EN LA OXIDACIÓN DE	
	Carbohidratos	Grasa	Carbohidratos	Grasa
0,70	0	100	0	100
0,75	14,7	85,3	15,6	84,4
0,80	31,7	68,3	33,4	66,6
0,85	48,8	51,2	50,7	49,3
0,90	65,9	34,1	67,5	32,5
0,95	82,9	17,1	84,0	16,0
1,00	100	0	100	0

Cada g de nitrógeno en la orina indica que se han oxidado 6,25 g de proteínas y que se han producido aproximadamente 4,8 l de CO₂ y consumido 6 l de O₂. Sabiendo, por tanto, los gramos de nitrógeno en orina se pueden conocer los litros de O₂ utilizados y los de CO₂ producidos por la oxidación de proteínas. Basta restar estas cantidades del O₂ total consumido y del CO₂ total producido (que es posible determinar por calorimetría) para obtener el CR no proteico (CR_{np}), que se tratará con más detalle en el **Capítulo 16**. Conociendo el valor del mismo es factible establecer las proporciones de grasa y carbohidratos (CR de 1 y 0,7, respectivamente) y a partir de dicho dato la cantidad de kilocalorías liberadas por litro de oxígeno (**Tabla 8.3**).

8.1.3. Utilización del combustible energético

Las curvas de utilización aeróbica y anaeróbica de los sustratos oxidables van a depender de factores diversos, tales como la intensidad del ejercicio o el nivel de entrenamiento. En la **Figura 8.4** se muestra este hecho, en donde se expresan el consumo de oxígeno (VO₂, oxígeno inspirado) y la producción de ácido láctico, en dos hipotéticos individuos; o también pudiera ser en un mismo individuo con poca actividad deportiva y tras un periodo importante de entrenamiento.

a) Individuo no entrenado

En el caso de individuo no entrenado se observa que el consumo de oxígeno parte de un nivel de reposo que en el ejemplo de la gráfica estaría alrededor de 0,25 l/min. A medida que se hace ejercicio y especialmente si éste va incrementando su intensidad, el consumo de oxígeno aumenta paulatinamente, y llega un momento en que se alcanza una meseta, en donde a mayor esfuerzo, no puede haber un mayor consumo de oxígeno, pues se ha llegado al límite fisiológico. Este valor de $VO_{2m\acute{a}x}$ puede ser de 4 a 4,5 l/min.

Asimismo, el ácido láctico, medido por su nivel en sangre en un momento determinado, empieza a elevar su nivel muy ligeramente al principio, lo que es lógico ya que como antes se indicaba existe producción de ácido láctico aunque el metabolismo sea básicamente aeróbico. Pero llega un punto de gran inflexión en donde ya se produce un evidente aumento de ácido láctico. Ese punto es el llamado *umbral anaeróbico*, el cual en la situación descrita se alcanza cuando el VO_2 es aproximadamente el 65% del $VO_{2m\acute{a}x}$. Y es precisamente como porcentaje de la máxima captación de oxígeno como se expresa el citado umbral anaeróbico.

Es en ese punto cuando comienza a originarse una metabolización anaeróbica muscular de la glucosa. La producción de ácido láctico generará una importante lactacidemia, que puede hacer disminuir el pH sanguíneo desde el valor normal de 7,35 hasta 7 e incluso algo menos, lo que conduce a fatiga muscular, de tal modo que esfuerzos superiores o mantenidos no son posibles de llevar a cabo hasta que el ácido láctico de músculos y sangre no se metabolice aeróbicamente en hígado para producir glucosa o en músculo cardíaco y otros tejidos (excepto sistema nervioso y hematíes) a través del metabolismo aeróbico o en el propio músculo esquelético también aeróbicamente.

b) Individuo entrenado

En el individuo entrenado, como se puede observar en la gráfica, el volumen de oxígeno inspirado en reposo es algo superior y sobre todo lo que aumenta es el $VO_{2m\acute{a}x}$, que puede llegar a ser un 20% superior (o algo más), al que ocurría en la situación previa de no entrenamiento.

Asimismo, los niveles sanguíneos de ácido láctico muestran el umbral anaeróbico más tardíamente, y a niveles de consumo de oxígeno más cercanos al $VO_{2m\acute{a}x}$, como por ejemplo 80-85% del mismo, siendo bastante variable ese valor de umbral anaeróbico.

En función de lo dicho, el umbral anaeróbico y el aumento en la capacidad aeróbica es el mejor índice en cuanto a la capacidad de mantener un determinado nivel de

intensidad de ejercicio. De ahí que el entrenamiento de resistencia, entre otras cosas, persiga este incremento de suficiencia aeróbica, en donde tanto se elevan los rendimientos energéticos por metabolización oxidativa de substratos.

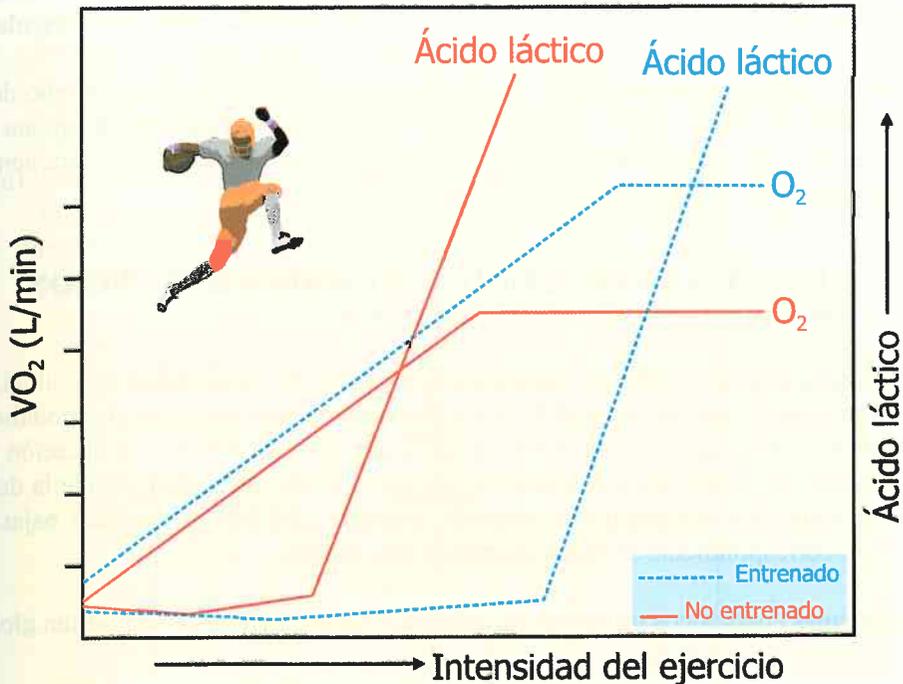


Figura 8.4. Consumo de oxígeno y niveles de ácido láctico sanguíneo en sujetos entrenados y no entrenados.

(Adaptado de Mataix y González Gallego, 2002).

8.1.4. Control hormonal de la utilización del combustible energético

Diversas hormonas juegan un papel crucial regulando la utilización de sustratos energéticos durante el ejercicio.

La concentración sanguínea de glucosa en el ejercicio depende del equilibrio entre su liberación hepática y captación muscular. El ejercicio incrementa la secreción de glucagón, que promueve la glucogenólisis y la gluconeogénesis hepática, y también aumenta la liberación de catecolaminas, que contribuyen asimismo a la estimulación de la degradación del glucógeno.

El incremento en la secreción de cortisol estimula el catabolismo proteico, permitiendo la utilización de aminoácidos en la gluconeogénesis, y la hormona de creci-

miento disminuye la captación celular de glucosa, contribuyendo a mantener sus niveles sanguíneos.

Aunque los niveles de insulina disminuyen durante el ejercicio, hay un aumento de la sensibilidad de las células musculares a la misma, produciéndose un reclutamiento de receptores para la glucosa y una estimulación de su captación muscular.

Los ácidos grasos almacenados en forma de triglicéridos se liberan por medio de la lipasa adiposa, enzima que es estimulada por cortisol, catecolaminas y hormona del crecimiento. Las concentraciones plasmáticas de estas hormonas se incrementan con la progresión del ejercicio, estimulando la lipólisis.

8.2. SISTEMAS ENERGÉTICOS UTILIZADOS EN FUNCIÓN DE LA MODALIDAD DEPORTIVA

La utilización de los sustratos independientemente de la variabilidad individual, se relaciona con el tipo de actividad física que implica una determinada modalidad deportiva y especialmente con dos factores, intensidad del ejercicio y duración del mismo, que se condicionan mutuamente. Es decir, a una intensidad grande la duración tiene que ser obligadamente pequeña, mientras que con intensidades bajas, el ejercicio correspondiente se puede mantener más tiempo.

Los sistemas energéticos utilizados en diferentes tipos de ejercicio se podrían globalizar de la manera siguiente:

- a) *Ejercicios de intensidad (o potencia) máxima y duración mínima (menos de 30 segundos).*

Ejercicios como pueden ser carreras de velocidad de 100 y 200 metros lisos, saltos, pesas, golpes de tenis, de fútbol, de golf, lanzamiento de peso, etc., utilizan única o en gran medida el sistema del creatinfosfato, capaz de suministrar en poco tiempo una gran cantidad de energía. Así, en términos medios, la velocidad máxima de provisión de ATP por este sistema es de 3,6 moles de ATP/min. El inconveniente es que la capacidad total de suministro de ATP por parte de los fosfágenos es, como ya se indicó, de 0,6 moles, lo que hace que este sistema se agote en unos 10 segundos.

- b) *Ejercicios de menor grado de intensidad y mayor duración (30 segundos a 1,5 minutos).*

En ejercicios tales como carreras de 400 metros, pruebas de natación de 100 metros, etc., se utiliza, además del sistema de fosfágeno, el del ácido láctico. Este último presenta una velocidad de provisión de 1,6 moles de ATP/min, que es bastante menor que la de creatinfosfato, pero suficientemente elevada

como para satisfacer la velocidad de demanda energética de los deportes incluidos en este grupo.

- c) *Ejercicios de menor intensidad y duración inferior a 3 minutos.*
 En carreras de 800 metros lisos, pruebas gimnásticas, boxeo (asaltos de tres minutos), lucha (asaltos de dos minutos), etc., además del sistema del ácido láctico, ya puede operar el sistema aeróbico. Este último presenta una velocidad máxima de suministro energético de 1 ATP/min y una capacidad máxima de provisión calórica prácticamente ilimitada, como ya se ha indicado.
- d) *Ejercicios de baja intensidad y duración superior a tres minutos.*
 En este tipo de ejercicios, con ejemplos como la marcha, esquí de fondo, pruebas de natación de distancia media y fondo, maratón, etc., el sistema predominante es el aeróbico.

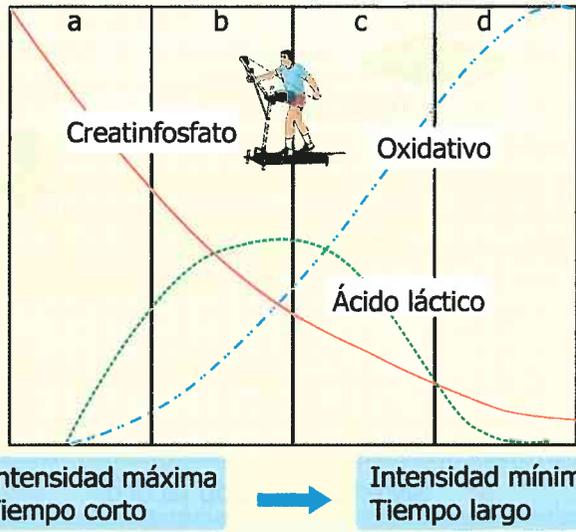


Figura 8.5. Contribución de los diferentes sistemas de provisión de energía. (Adaptado de Fox, 1987).

En la **Figura 8.5** se observa de una manera global cómo contribuyen los tres sistemas de provisión energética a los distintos tipos de deportes, delimitados en función de intensidad o potencia y tiempo de la prueba. Así los ejercicios de una muy gran intensidad y tiempos mínimos incluidos en el apartado a) anterior, utilizan única o mayoritariamente el sistema del fosfágeno.

Cuando disminuye la intensidad, aunque sigue siendo elevada, y concomitantemente aumenta el tiempo (apartado b), el sistema del fosfágeno funciona, el del

ácido láctico llega a ser máximo, y también empieza a ser operativo, aunque en menor grado, el aeróbico.

La situación siguiente (apartado c) sigue siendo soportada por el sistema del ácido láctico, aumentando en gran manera el aeróbico y siendo residual el del fosfágeno.

Finalmente (apartado d), en pruebas prolongadas o de resistencia, el sistema mayoritario es el aeróbico.

A modo de ejemplo, en la **Figura 8.6** se representa la cantidad total de ATP requerido en una carrera pedestre de 1.400 metros (6 mmol ATP) y otra de natación de 600 metros (11 mmol ATP), así como la cantidad máxima que pueden aportar los tres sistemas energéticos que pueden utilizarse durante el ejercicio.

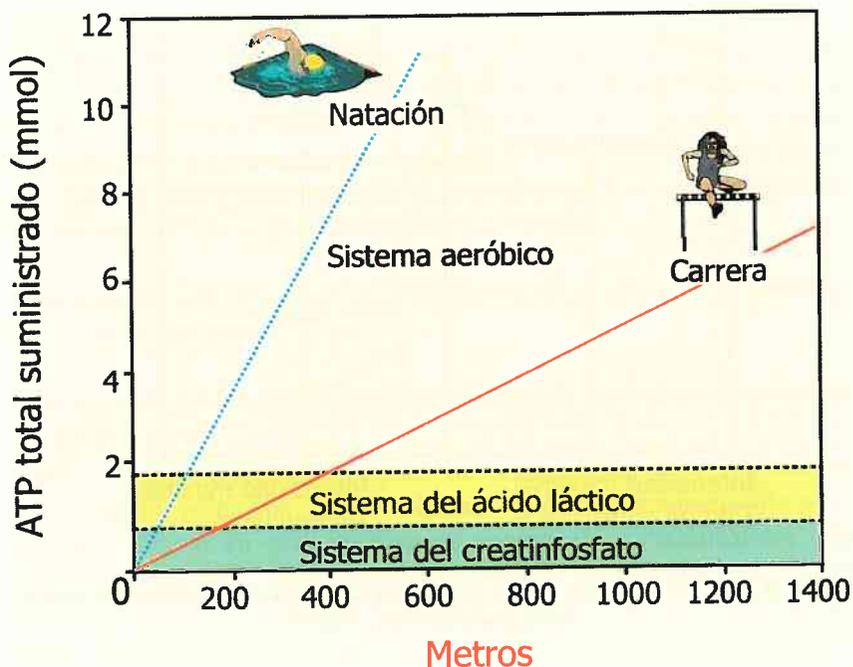


Figura 8.6. Energética de una carrera pedestre y otra de natación en relación con los tres sistemas energéticos. (Adaptado de Fox, 1987).

8.3. METABOLISMO ENERGÉTICO Y TIPOS DE FIBRAS MUSCULARES

Como ya se adelantó en el **Capítulo 7**, desde el punto de vista de utilización energética se pueden distinguir tres tipos de fibras:

Tipo I. *Fibras rojas de contracción lenta y metabolismo aeróbico.*

Estas fibras utilizan fundamentalmente el sistema aeróbico para obtener energía. Contienen buenos depósitos de glucógeno y triglicéridos, siendo capaces de usar los ácidos grasos como fuentes mayoritarias de energía. Por ello, estas fibras son las que actúan predominantemente en las actividades deportivas de resistencia.

Tipo II_a. *Fibras rojas de contracción rápida y metabolismo aeróbico y anaeróbico.*

Poseen características similares a las tipo I, pero también presentan capacidad glucolítica anaeróbica (sistema del ácido láctico), como las fibras tipo II_b.

Tipo II_b. *Fibras blancas de contracción rápida y metabolismo anaeróbico.*

Son fundamentalmente fibras que utilizan el sistema del ácido láctico y del fosfágeno. Sus elevadas concentraciones de ATPasa les permiten degradar rápidamente el ATP con fines contráctiles. Poseen asimismo altas concentraciones de glucógeno que utilizarán la vía del sistema del ácido láctico mencionado. Por el contrario, presentan una capacidad limitada para usar grasa o glucógeno vía aeróbica.

Esa distinta manera de utilización metabólica de sustratos permite entender por qué los atletas de resistencia presentan una mayor proporción de fibras tipo I que los velocistas, en donde predominan las tipo II_b, aunque todos poseen fibras de diversos tipos, y además hay una gran variabilidad en las proporciones de cada tipo aún existiendo el modelo general expuesto.

8.4. LA FATIGA MUSCULAR

La fatiga es un mecanismo defensivo que tiene como objeto el prevenir la aparición de lesiones celulares irreversibles cuando se alteran las funciones orgánicas por motivos muy diversos. Según el tiempo de aparición se puede distinguir entre:

- **Fatiga aguda.** Se presenta en una sesión de entrenamiento o competición y puede afectar a un grupo localizado de músculos o a la totalidad de la musculatura.
- **Fatiga subaguda.** También se conoce con la denominación de sobrecarga. Se produce por niveles de entrenamiento relativamente altos que exceden al nivel de tolerancia del músculo. Aparecen alteraciones de tipo inflamatorio y lesiones musculares más o menos intensas entre las 8 y 72 horas tras el sobre esfuerzo.
- **Fatiga crónica.** El síndrome de sobreentrenamiento aparece cuando se va desequilibrando la relación entre entrenamiento o competición y recuperación. La diferencia con la anterior radica fundamentalmente en la duración y el tiempo requerido para la curación.

8.4.1. Mecanismos de aparición de la fatiga

Los principales mecanismos de aparición de la fatiga se relacionan con la acumulación de metabolitos, depleción de sustratos energéticos, modificaciones hidroelectrolíticas, afectación en la captación de aminoácidos y alteraciones enzimáticas.

a) Acumulación de metabolitos

La presencia de un exceso de determinados metabolitos originados en la realización del ejercicio físico puede ejercer un efecto inhibitor en la continuación del mismo.

Uno de estos metabolitos, el *amoníaco*, se genera a partir del AMP producido en el ejercicio intenso. El amoníaco inhibe el ciclo de Krebs, la gluconeogénesis y la oxidación mitocondrial. También tiene un efecto depresor central y de reducción del número de fibras activas por alteraciones de su membrana.

Los *hidrogeniones* aparecen como consecuencia de la formación de ácido láctico. Reducen los potenciales de acción de la membrana muscular, inhiben la fosforilasa y la fosfofructoquinasa y limitan la liberación de ácidos grasos desde el tejido adiposo.

Finalmente, el *fósforo inorgánico* liberado por degradación del ATP puede limitar la producción de fuerza uniéndose a la cabeza de la miosina.

b) Depleción de sustratos

La depleción del creatinfosfato y especialmente la del glucógeno muscular, cuyos depósitos son limitados, pueden ser factores limitantes en la producción de energía para la contracción. Este aspecto se comentará con detalle más adelante.

c) Modificaciones hidroelectrolíticas

En situaciones de alto riesgo térmico o en pruebas de muy larga duración, la pérdida excesiva de agua puede originar una disminución del volumen plasmático y la pérdida de iones, una alteración del potencial de membrana y una afectación de la transmisión de impulsos nerviosos.

d) Afectación en la captación de aminoácidos

Los aminoácidos ramificados (leucina, valina e isoleucina) son aminoácidos esenciales que, a excepción del resto de los esenciales, se degradan en tejidos extrahepáticos, fundamentalmente en el músculo esquelético. Durante ejercicios prolongados

se ha propuesto que la reducción plasmática de los aminoácidos ramificados respecto al aminoácido aromático triptófano libre puede llevar a un incremento en la síntesis de 5-hidroxitriptamina (serotonina) cerebral y a la aparición de fatiga. La razón es que se produce un desequilibrio entre aminoácidos ramificados y triptófano (véase [Capítulo 11](#)).

e) Alteraciones enzimáticas

Cuando se reduce la resíntesis de ATP en situaciones de fatiga, se produce la alteración de una serie de enzimas que requieren del mismo para su funcionamiento. Entre ellas están la miosina ATPasa, relacionada con la bomba de Na^+/K^+ , la hexoquinasa, que degrada la glucosa, o la Ca^{++} -ATPasa, implicada en la recaptación de calcio por el retículo sarcoplasmático.

8.4.2. Fatiga y rendimiento

La prevención de la fatiga durante una actividad deportiva no resulta tan relevante como la posibilidad de demorarla, lo que permitiría mantener o mejorar el rendimiento en las partes inicial y media de la prueba y, a pesar de ello, realizar un mayor esfuerzo al final.

Una forma de lograr dicho efecto es a través del entrenamiento. Por ejemplo, se puede trabajar de forma más intensa para no producir tanto ácido láctico después del entrenamiento. En los atletas con un entrenamiento de resistencia se utiliza más grasa como combustible en lugar de glucógeno (véase [Capítulo 9](#)) y existe un ahorro de glucógeno que evita la depleción de sus reservas musculares y hepáticas (véase [Capítulo 9](#)). En otros casos interviene la adaptación al ambiente. Así, una aclimatación al calor ambiental contribuye a reducir la hipertermia y la pérdida de electrolitos (véase [Capítulo 14](#)).