

INTEGRACIÓN METABÓLICA DURANTE EL EJERCICIO

El organismo humano no dispone de una única vía para producir energía durante el ejercicio; por el contrario, articula de manera simultánea y jerarquizada tres grandes sistemas energéticos: el sistema de los fosfágenos (ATP-fosfocreatina), la glucólisis anaeróbica y el sistema oxidativo (aeróbico). La integración metabólica se refiere precisamente a la forma en que estos tres sistemas interactúan, se superponen y se ajustan de manera continua para cubrir las demandas energéticas que impone el ejercicio, en función de su intensidad, duración y del estado de entrenamiento del deportista.

Comprender la integración metabólica implica superar la idea simplista de que cada sistema energético opera de forma exclusiva o secuencial. En realidad, desde el primer segundo de un esfuerzo físico y hasta su finalización, los tres sistemas contribuyen simultáneamente a la resíntesis de ATP, aunque con una participación porcentual distinta según el momento del ejercicio. Esta noción es fundamental para el profesional del deporte, ya que permite diseñar programas de entrenamiento y estrategias nutricionales verdaderamente ajustadas a la exigencia metabólica real de cada disciplina.

McArdle, Katch y Katch (2022) señalan que la energía para la actividad muscular proviene de la interacción continua entre las vías anaeróbicas y aeróbicas, y que la proporción de participación de cada una depende fundamentalmente de la intensidad y la duración del esfuerzo, más que de una sustitución completa de un sistema por otro.

Los tres sistemas energéticos y su función en la integración

Sistema de los fosfágenos (ATP-PCr)

Es la vía de activación más rápida y de mayor potencia, pero de capacidad limitada. Utiliza las reservas intramusculares de ATP y fosfocreatina (PCr) para resintetizar energía de

forma casi inmediata, sin requerir oxígeno ni generar productos de desecho metabólico significativos. Predomina en los primeros segundos de esfuerzos máximos, como un sprint, un salto o un levantamiento explosivo.

Glucólisis anaeróbica

Se activa progresivamente conforme el esfuerzo se prolonga más allá de los primeros segundos y su intensidad se mantiene elevada. Utiliza el glucógeno muscular y la glucosa sanguínea como sustrato, generando ATP a una velocidad intermedia, con la producción de lactato e iones de hidrógeno como consecuencia del metabolismo anaeróbico. Es la vía predominante en esfuerzos de alta intensidad que se sostienen entre 10 segundos y 2 minutos aproximadamente.

Sistema oxidativo (aeróbico)

Constituye la vía de mayor capacidad, aunque de menor potencia inmediata. Emplea carbohidratos, lípidos y, en menor medida, proteínas como sustratos, y depende de la disponibilidad de oxígeno a nivel mitocondrial mediante el ciclo de Krebs y la cadena transportadora de electrones. Predomina en esfuerzos prolongados de baja a moderada intensidad, y es también la vía principal durante los periodos de reposo y recuperación.

El continuum energético según intensidad y duración

La integración metabólica puede representarse como un continuum en el que, a medida que se prolonga la duración del ejercicio, disminuye progresivamente la contribución relativa del sistema de los fosfágenos y de la glucólisis anaeróbica, mientras aumenta la del sistema oxidativo. No obstante, esta transición no es abrupta ni excluyente: en cualquier momento del ejercicio los tres sistemas están operando, solo que con distinta magnitud de aporte.

- Esfuerzos de 0 a 10 segundos (máxima intensidad): predominio del sistema de fosfágenos.
- Esfuerzos de 10 segundos a 2 minutos (alta intensidad): predominio glucolítico anaeróbico, con participación creciente del sistema oxidativo.

- Esfuerzos de 2 a 10 minutos (intensidad submáxima sostenida): transición hacia un mayor peso del metabolismo oxidativo, con aporte glucolítico relevante.
- Esfuerzos mayores a 10 minutos (resistencia): predominio claro del sistema oxidativo, con utilización combinada de carbohidratos y lípidos según la intensidad relativa.

Este esquema explica por qué disciplinas como los 100 metros planos, el levantamiento de pesas o el remate en voleibol dependen casi exclusivamente del sistema de fosfágenos, mientras que un maratón o el ciclismo de fondo dependen predominantemente del metabolismo oxidativo, aunque en ambos casos participan, en distinta proporción, los tres sistemas energéticos.

El fenómeno de cruce metabólico (crossover concept)

Un aspecto relevante de la integración metabólica es el llamado concepto de cruce (crossover concept), que describe cómo, a medida que aumenta la intensidad relativa del ejercicio, el organismo desplaza progresivamente su dependencia de las grasas hacia los carbohidratos como sustrato energético predominante. En intensidades bajas, la oxidación de ácidos grasos aporta la mayor parte de la energía; conforme la intensidad se eleva, la utilización de glucógeno muscular y glucosa se vuelve cada vez más determinante, debido a que la glucólisis puede generar ATP con mayor rapidez que la beta-oxidación, aunque a costa de una menor eficiencia energética por gramo de sustrato.

Este fenómeno tiene aplicaciones prácticas directas en el entrenamiento deportivo, ya que el estado de entrenamiento aeróbico de un deportista puede desplazar el punto de cruce hacia intensidades más altas, permitiéndole depender más tiempo de las grasas como sustrato y preservar así sus reservas de glucógeno para las fases decisivas del esfuerzo.

Importancia de la integración metabólica para el profesional del deporte

- Comprender cómo se integran los sistemas energéticos permite al profesional de la actividad física y el deporte:

- Diseñar programas de entrenamiento ajustados a la demanda energética real de cada disciplina deportiva.
- Interpretar con mayor precisión las causas bioquímicas de la fatiga en distintos momentos de la competencia.
- Planificar estrategias nutricionales coherentes con el sistema energético predominante en cada fase del esfuerzo.
- Optimizar los procesos de recuperación, reconociendo qué sustratos deben reponerse prioritariamente.
- Evitar interpretaciones simplistas que reduzcan el metabolismo del ejercicio a un solo sistema energético.

Ejemplos de integración metabólica en el ámbito deportivo

- Un jugador de baloncesto combina, durante un mismo partido, esfuerzos explosivos (fosfágenos), carreras repetidas de alta intensidad (glucólisis anaeróbica) y periodos de menor intensidad (metabolismo oxidativo), en un patrón intermitente.
- Un corredor de 800 metros depende inicialmente de la potencia glucolítica, pero conforme avanza la prueba requiere una contribución oxidativa creciente para sostener el ritmo.
- Un ciclista de ruta en una etapa de montaña alterna fases de esfuerzo submáximo sostenido (predominio oxidativo) con ataques cortos de alta intensidad (activación glucolítica y de fosfágenos).

Conclusión

La integración metabólica constituye uno de los principios bioquímicos más importantes para comprender el rendimiento deportivo, pues evidencia que el organismo no depende de un único sistema energético, sino de la articulación dinámica y simultánea de los tres sistemas disponibles, ajustada en todo momento a la intensidad, la duración y las condiciones del esfuerzo. Este conocimiento constituye la base científica para diseñar entrenamientos, estrategias nutricionales y procesos de recuperación verdaderamente pertinentes a cada disciplina deportiva.

Referencias:

- Chamorro, A. (2018). Bioquímica del ejercicio físico. Editorial Médica Panamericana.*
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2022). Fisiología del ejercicio: Nutrición, rendimiento y salud. Wolters Kluwer.*
- Powers, S. K., & Howley, E. T. (2017). Fisiología del ejercicio. Teoría y aplicación al entrenamiento y al rendimiento. Médica Panamericana.*