

REFLEXIONES

sobre la mecánica y el metabolismo
del trabajo de la **FUERZA MUSCULAR**



Jaume A. Mirallas Sariola, Gabriel Esparza Pérez,
Dr. Piero Galilea Ballarini, Dr. Franchek Drobnic Martínez

REFLEXIONES

sobre la mecánica y el metabolismo del trabajo de la **FUERZA MUSCULAR**

*Thoughts about mechanics
and muscle strength metabolism work*

JAUME A. MIRALLAS SARIOLA

*Departamento de Preparación Física. Centro de
Alto Rendimiento de Sant Cugat del Vallès (Barcelona)*

GABRIEL ESPARZA PÉREZ

*Oficina ARC. Centro de Alto Rendimiento de
Sant Cugat del Vallès (Barcelona)*

DR. PIERO GALILEA BALLARINI

*Departamento de Fisiología. Centro de Alto
Rendimiento de Sant Cugat del Vallès (Barcelona)*

DR. FRANČEK DROBNIC MARTÍNEZ

*Programa de Salud, Investigación y Servicios. Centro de
Alto Rendimiento de Sant Cugat del Vallès (Barcelona)*

AGRADECIMIENTOS

Muy especialmente a Juanjo Andújar por su capacidad innovadora y calidad humana; a Óskar Escalante por compartir sus conocimientos sobre la acrobacia y por la ayuda en la búsqueda bibliográfica; al Dr. Andreu Arquer por hacer posible la integración médico-deportiva en beneficio de la salud y el deporte; a Xavier Balius por su apoyo técnico y colaboración.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra

© 2019 Jaume A. Mirallas Sariola (jmirallas@car.edu), Gabriel Esparza Pérez, Dr. Piero Galilea Ballarini, Dr. Franchek Drobnic Martínez.

Ergon
C/ Arboleda, 1. 28221 Majadahonda (Madrid)
C/ Berruguete, 50. 08035 Barcelona

ISBN: 978-84-17844-01-1
Depósito legal: M-13418-2019

ÍNDICE

RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
LA FUERZA MUSCULAR	5
El trabajo de la fuerza muscular	7
Unidades de medida del trabajo y de la potencia de la fuerza muscular	7
A) Unidad de medida del trabajo	7
B) Unidad de medida de la potencia	8
El trabajo mecánico y la potencia mecánica	9
A) El trabajo mecánico	9
B) La potencia mecánica	10
Medición del trabajo mecánico y la potencia mecánica	10
Incremento progresivo de esfuerzo	13
El trabajo metabólico y la potencia metabólica	14
A) El trabajo metabólico	14
B) La potencia metabólica	14
Medición del trabajo metabólico y la potencia metabólica	15
CONCLUSIONES	15
BIBLIOGRAFÍA	16

RESUMEN

En el ámbito del deporte, la capacidad de producir tensión de los grupos musculares se define como fuerza muscular. La fuerza muscular es la causa del movimiento del cuerpo humano que nos permite realizar cualquier ejercicio. De los principios de la mecánica y de la fisiología, y de sus aplicaciones al movimiento del cuerpo humano, en concreto a las acciones deportivas, era necesario hacer un proceso de análisis y reflexión del trabajo de la fuerza muscular. En el entrenamiento deportivo, el deportista genera energía mecánica y metabólica. Y al mismo tiempo produce fuerza muscular, que se transforma en trabajo mecánico y metabólico. La valoración y control de este trabajo mecánico y metabólico es fundamental para dosificar racionalmente la intensidad y el volumen de la carga de las sesiones de entrenamiento, y optimizar el rendimiento del deportista. El trabajo mecánico y metabólico son dos variables resultantes de la producción de energía mecánica y metabólica con una relación de proporcionalidad directa. El trabajo mecánico es el producto de una fuerza por el desplazamiento o por la velocidad. Y la valoración del trabajo metabólico se mide a partir del trabajo mecánico, que representa un 24% de la eficiencia del trabajo metabólico, resultado obtenido de una forma indirecta del consumo de oxígeno (VO_2) a partir de la carga realizada. Los profesionales del deporte podrán medir mejor el trabajo de la fuerza muscular: el trabajo mecánico es equivalente al 24% de la cantidad de trabajo metabólico.

PALABRAS CLAVE: fuerza muscular; trabajo mecánico; trabajo metabólico.

ABSTRACT

In the field of sport, the capacity to produce muscle tension is defined as muscle strength. Muscle strength is the responsible for the movement of the human body, which allows us to perform exercise. From the principles of mechanics and physiology, and their applications to human movement, specifically to sporting actions, it was necessary a process of analysis and reflection of the work of muscular strength. In sports training, athletes generate mechanical and metabolic energy. At the same time produce muscle strength, which is transformed into mechanical and metabolic work. The evaluation and control of this amount of mechanical and metabolic work is essential to rationally adjust the intensity and volume of the training sessions load and to optimize athletic performance. Mechanical and metabolic work are two resultant variables from mechanical and metabolic energy production a relation of direct proportionality. Mechanical work is the product of a force multiplied by a displacement or a velocity. Metabolic work is measured from mechanical work, which represents 24% of metabolic work efficiency, indirectly obtained from oxygen consumption (VO_2) as a result of the supported load. Sports professionals can better measure the work of muscle strength: mechanical work is equivalent to 24% of the amount of metabolic work.

KEYWORDS: muscle strength; mechanical work; metabolic work.

INTRODUCCIÓN

El objetivo del contenido de este artículo es dar a conocer en el ámbito del deporte cómo se puede medir la gran cantidad de energía producida por la fuerza muscular. También en la rehabilitación funcional del aparato locomotor y la readaptación al entrenamiento puede ser de gran utilidad. Pretende informar a todos aquellos profesionales del mundo del deporte, especialmente a licenciados y graduados en ciencias de la actividad física y del deporte, entrenadores, preparadores físicos, médicos, fisioterapeutas, recuperadores y biomecánicos, que la fuerza muscular se mide como un trabajo mecánico y metabólico, y así poder cuantificar y dosificar racionalmente la carga de las sesiones de entrenamiento y optimizar el rendimiento del deportista.

Los profesionales del mundo del deporte no solo deben tener claros los conceptos, sino que también han de conocer con exactitud qué leyes rigen el entrenamiento deportivo y cómo afectan al deportista: la ley psicofisiológica de Selye (síndrome general de adaptación), la ley psicofisiológica de Schultz (umbral de sensibilidad individual) y la ley psicofísica de Weber-Fechner (relación de la magnitud de un estímulo físico y su percepción) son sus fundamentos. La metodología del entrenamiento deportivo debe permitir dosificar la fatiga como consecuencia del estrés provocado por el trabajo mecánico (T_M) y el trabajo metabólico (T_{MT}) de la fuerza muscular. La intensidad del estímulo de la carga debe causar una respuesta de adaptación, controlando la relación cuantitativa entre la magnitud de este estímulo y cómo es percibido por el deportista.

Solo con las tres leyes fundamentales del entrenamiento deportivo no es posible medir la cantidad de T_M y T_{MT} producido por el deportista. Las *Reflexiones sobre la mecánica y el metabolismo del trabajo de la fuerza muscular* permitirán

saber cómo medir esa cantidad de T_M y T_{MT} . Su valoración y control debe proporcionar la información necesaria para poder dosificar de forma racional la intensidad y el volumen de la carga de las sesiones de entrenamiento.

LA FUERZA MUSCULAR

La fuerza muscular es cualquier tensión producida por los grupos musculares. Se define como la capacidad del sistema neuromuscular para generar tensión en los diferentes grupos musculares durante un tiempo determinado (González Badillo & Gorostiaga Ayestarán, 2002). Esta tensión se puede efectuar durante menos tiempo (rápida) o más tiempo (lenta) y permitirá realizar cualquier movimiento. La evaluación del tiempo utilizado (rapidez) del T_M y T_{MT} se denomina potencia mecánica (P_M) y potencia metabólica (P_{MT}) respectivamente. La fuerza muscular es el resultado de la integración de múltiples tensiones musculares, que se manifiestan como fuerza muscular estática y fuerza muscular dinámica.

En función de la intensidad de estas tensiones musculares se clasifican las manifestaciones de la fuerza muscular (Fig. 1).

La fuerza muscular dinámica¹ es causa del movimiento del cuerpo humano y produce un T_M y T_{MT} ; en cambio, la fuerza muscular estática² (Tous, 1999) es causa de la posición de equilibrio del cuerpo en situaciones estáticas y produce un T_{MT} con un T_M igual a 0. Pero este T_{MT} que puede ser a veces muy elevado, genera una tensión mecánica (σ)³ y una presión intramuscular producida por vibraciones.

Estas vibraciones son pequeños movimientos periódicos, repetitivos, alrededor de una posición de equilibrio estático de todas las partes del cuerpo involucradas en la fuerza muscular estáti-

1 La fuerza muscular dinámica genera un esfuerzo psicofísico y psicofisiológico.

2 La fuerza muscular estática solo genera un esfuerzo psicofisiológico (Tous, 1999).

3 Ley de Hooke.



FIGURA 1. Las manifestaciones de la fuerza muscular (*La fuerza absoluta no se manifiesta de forma voluntaria, ni en el entrenamiento ni en la competición, solo en situaciones psicológicas extremas).

ca, que se mueven juntas en la misma dirección y que consumen energía⁴, y, en consecuencia, pueden ocasionar fatiga neuromuscular⁵.

La fuerza muscular estática también puede manifestarse acompañada de la fuerza muscular dinámica, estabilizando, apoyando o contrarrestando las acciones musculares dinámicas. Este tipo de acciones son más frecuentes en el deporte que las propias acciones musculares estáticas. Lo más relevante es la utilización integrada de la fuerza muscular estática y la fuerza muscular dinámica, en la rehabilitación funcional y en los programas de prevención de lesiones.

El T_M y T_{MT} de la fuerza muscular dinámica es el producto del esfuerzo realizado por el deportista y está dirigido por su capacidad de activación y de resistencia psicofisiológica. La fuerza muscular dinámica utiliza la alternan-

cia entre tensión y relajación de la contracción muscular (acción de bombeo), y esto garantiza en gran medida la irrigación muscular, facilitando la utilización del metabolismo aeróbico (Zintl, 1991), la regulación de la temperatura y el pH⁶. Estos T_M y T_{MT} pretenden alcanzar el máximo rendimiento del deportista en la competición, produciendo cambios funcionales y estructurales en su organismo, y nuevas adaptaciones en su comportamiento psicomotor. Para conseguirlo es imprescindible integrar las leyes fundamentales del entrenamiento deportivo⁷. La medida óptima específica de la cantidad de T_M y T_{MT} quedará determinada por la velocidad con la que se realiza el ejercicio, que se define en el campo de la física como P_M , y en el ámbito del entrenamiento deportivo como fuerza explosiva.

4 La energía tiene las siguientes propiedades: se transfiere, se transforma, se puede almacenar y se transporta.

5 La fatiga neuromuscular (central o periférica) provoca adaptaciones del sistema neuromuscular para mantener la producción de la fuerza muscular; La fatiga neuromuscular puede entenderse como un proceso adaptativo y protector al mismo tiempo, que limita la actividad muscular nociva para el organismo.

6 El pH es una medida cuantitativa de la acidez o la alcalinidad de la sangre.

7 Ley del Síndrome General de Adaptación, ley del Umbral y ley de Weber-Fechner.

La consecuencia del T_M y T_{MT} de la fuerza muscular dinámica es un estrés en el deportista (síndrome general de adaptación), que puede considerarse una emoción (es la activación⁸ de su comportamiento psicomotor para ser creativo) y el ritmo de ejecución mide el grado de emoción (de activación), producto de la intensidad del estímulo de la carga del entrenamiento y causante de la fatiga. De la sensibilidad cines-tésica (Mirallas, 2007) del deportista (umbral de sensibilidad individual) para captar el T_M y el T_{MT} dependerá su reacción, que se denomina adaptación. La relación entre la intensidad del T_M y del T_{MT} y la sensación producida en el deportista es proporcional a la magnitud de este T_M y T_{MT} (relación de la magnitud de un estímulo físico y su percepción).

EL TRABAJO DE LA FUERZA MUSCULAR

El trabajo de la fuerza muscular es la cantidad de T_M y T_{MT} resultado del proceso de transformación de energía química en metabólica, por la ruptura del trifosfato de adenosina (ATP⁹) en difosfato de adenosina (ADP), que se pierde en forma de calor, y una pequeña parte es transferida a la contracción muscular y transformada en fuerza muscular.

La fuerza muscular se manifiesta de forma estática y dinámica. Cualquier contracción muscular no genera necesariamente movimiento, este dependerá de la magnitud¹⁰ de la carga ejercida y de la tensión producida por los grupos musculares.

La energía metabólica de la contracción muscular mayoritariamente proviene del ATP y solo una parte de esta energía es producida

por los alimentos. El ATP transporta la energía metabólica en el interior de las células a través del metabolismo energético para transformarla en energía mecánica. Es el intermediario energético necesario en la transducción¹¹ de la energía metabólica de los alimentos ingeridos en la energía mecánica de la contracción muscular y en el T_M . En el lenguaje deportivo se han incorporado los términos metabolismo aeróbico y anaeróbico. En realidad, estos términos responden al comportamiento metabólico de las células musculares durante el esfuerzo.

Unidades de medida del trabajo y de la potencia de la fuerza muscular

A) Unidad de medida del trabajo

La unidad de medida, a partir de un patrón de referencia, es el valor numérico estandarizado de una determinada magnitud, que se obtiene como resultado de una medición con el fin de controlar y optimizar una dosificación racional de las cargas de trabajo de las sesiones de entrenamiento. Es necesario cuantificar el trabajo de la fuerza muscular con una unidad de medida determinada. A continuación se explican las unidades de medida del trabajo de la fuerza muscular.

$$1J = 1N \cdot m = \left(\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot m = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

1J = 1 julio; 1N·m = 1 newton-metro; m = metros; kg = kilogramos; s = segundos

La unidad de medida del trabajo de la fuerza muscular y también de la energía mecánica¹² y la energía metabólica es el julio (J). El J se define como la cantidad de T_M o T_{MT} realizado por una fuerza constante de un newton durante un

8 Activación: tensión psiconeuromotora (Mirallas, 2007).

9 El ATP es la principal molécula de transferencia de energía en las reacciones químicas utilizada por todos los organismos vivos.

10 Fuerza necesaria para modificar el estado de movimiento o reposo de un cuerpo con una determinada masa.

11 La transducción de la energía es el mecanismo de la síntesis de ATP y el transporte de iones por la membrana plasmática, la membrana interna de las mitocondrias y la membrana tilacoide (membranas transductores de la energía).

12 La energía mecánica es la suma de las energías cinética y potencial de un cuerpo. A veces, la energía mecánica de un cuerpo puede estar formada solo por uno de estos dos tipos de energía. En el entrenamiento deportivo, la energía mecánica se define como la capacidad que tiene el deportista para realizar un trabajo.

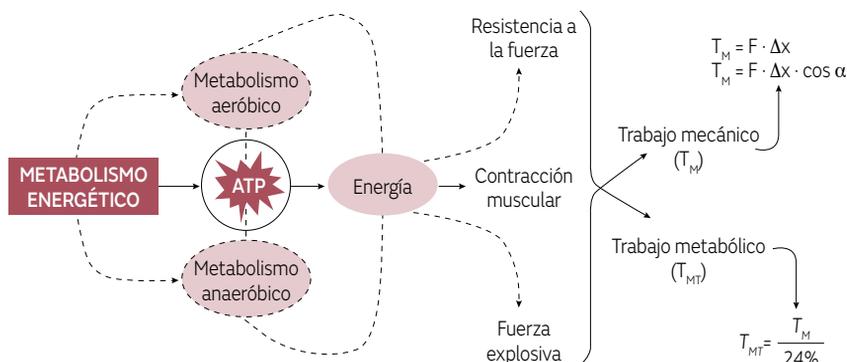


FIGURA 2. El metabolismo aeróbico y anaeróbico se transforma en el trabajo de la fuerza muscular.

metro de longitud en la misma dirección de la fuerza (N·m).

El julio (J) permite cuantificar el trabajo de la fuerza muscular de un ejercicio constante al desplazarse una trayectoria (distancia), en una situación concreta, y también evaluar de forma global la cantidad de trabajo de la fuerza muscular de todos los ejercicios desarrollados en el proceso de entrenamiento deportivo. De esta manera, el entrenador puede controlar la carga del trabajo de la fuerza muscular y programar una dosificación racional en cada uno de los ejercicios.

B) Unidad de medida de la potencia

En el deporte es muy útil medir el trabajo de la fuerza muscular de un ejercicio en relación con el tiempo (potencia de la fuerza muscular): la P_M que medirá el T_M en vatios (W), y la P_{MT} que medirá el T_{MT} en julios por segundo (J/s), como unidades de medida. Es necesario recordar que 1 julio es equivalente a 1 vatio por segundo (W·s) o 1 newton por metro (N·m), y 1 W es equivalente a 1 J/s. El T_M y el T_{MT} se pueden efectuar de

manera rápida o lenta, pero esto no hace variar el resultado del trabajo:

$$1J = 1Ws = 1N \cdot m$$

$$1W = 1 \frac{J}{s} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = 1 \frac{N \cdot m}{s}$$

Para alcanzar el éxito en la competición deportiva, las acciones tácticas se realizan en el menor tiempo posible. La velocidad y el ritmo de ejecución caracterizan el tipo de movimiento y de desplazamiento. La velocidad de ejecución es el grado de rapidez con la que se realizan estas acciones, y el ritmo de ejecución, el intervalo de tiempo entre una acción y la siguiente. Para valorar la efectividad funcional¹³ de las acciones tácticas, que representa la valoración cualitativa del gasto energético, es imprescindible elaborarlas en óptimas condiciones de eficacia, y relacionar la velocidad y el ritmo de ejecución con la consecución de los objetivos propuestos.

A continuación se muestran dos ejemplos para ilustrar la diferencia entre el T_M y el T_{MT} en función de la velocidad de ejecución (no se

13 Efectividad funcional o funcionalidad es la acción técnica o táctica perfectamente adaptada a la tarea para la que ha sido diseñada.

TABLA I. Por ejemplo, una acción técnica de taekwondo ejecutada a la máxima velocidad (v) posible, un "ap chagui" (golpeo frontal con el pie), puede generar un T_M de 540 J con una P_M de 2160 W. Y esta acción técnica ejecutada en la fase de aprendizaje a una velocidad (v) moderada, genera el mismo T_M de 540 J, pero con una P_M de 540 W, un 75% inferior

Acción técnica de taekwondo "ap chagui"	F (N)	m (kg)	a (m/s ²)	v (m/s)	e (m)	t (s)	T_M (J)	P_M (W)	T_{MT} (J)	P_{MT} (W)	E (kcal)	E (W)
1R (máxima v posible)	360	30	12	6	1,5	0,25	540	2160	2266	9064	0,13	0,15
5R (máxima v posible)						3564	14956		0,85		0,99	
1R (v moderada)				1		540	2266	0,13	0,15			
5R (v moderada)				3564		540	2266	0,85	0,99			

contempla el ritmo de ejecución, porque el movimiento solo se realiza una vez de una acción técnica y un ejercicio psicofísico (cálculo a partir del gasto calórico con un cociente respiratorio de 4,85 kcal/L VO_2 en el QR=0,84; relación VO_2 - T_{MT} de 12,4 ml/min/watt, que representa un 24% de la eficiencia del T_{MT}).

EL TRABAJO MECÁNICO Y LA POTENCIA MECÁNICA

A) El trabajo mecánico

El T_M es la energía mecánica transformada en energía cinética (E_c). Es el resultado de la transferencia de la energía mecánica a un cuerpo, que se mueve a una velocidad constante, y que depende de su masa y de la velocidad alcanzada. El T_M del deportista puede hacer variar su estado de movimiento, pero también puede generar un T_M debido a la posición que ocupa en el espacio. La energía mecánica de un cuerpo es la suma de sus energías: la energía cinética (E_c), asociada al movimiento, la energía potencial (E_p), que depende solo de la posición o el estado del

sistema involucrado, la energía potencial gravitacional (E_{pg}) y la energía potencial elástica (E_{pe}).

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

E_c (J) = energía cinética; m (kg) = masa del cuerpo; v (m/s) = velocidad del cuerpo

La energía cinética (E_c)¹⁴ es la capacidad¹⁵ de T_M de un cuerpo a causa de su movimiento y es equivalente a la cantidad¹⁶ de T_M necesario para establecer su velocidad a partir de su estado de reposo. Es proporcional a la masa del cuerpo y aumenta con la velocidad. La energía cinética (E_c) se consigue aplicando una fuerza sobre un cuerpo para producir cambios en su velocidad. Y cuanto más tiempo se esté aplicando esta fuerza, mayor será la velocidad del cuerpo.

La energía potencial gravitacional (E_{pg})¹⁷ es el trabajo del campo gravitatorio al levantar un cuerpo a una altura determinada, capaz de generar una cantidad de T_M como consecuencia de su posición y/o configuración. Por el hecho de encontrarse bajo la fuerza de la gravedad, depende de la posición vertical del cuerpo y de su masa.

14 La E_c está basada en la segunda ley de Newton. A partir de la E_c se deriva el teorema de la E_c y el teorema de la conservación de la E_c .

15 La capacidad se entiende como la potencialidad para la ejecución de un trabajo.

16 La cantidad se entiende como un trabajo medible.

17 Leyes de Kepler basadas en la observación del movimiento de los planetas, que facilitaron más tarde a Newton la formulación de la Ley de la Gravitación Universal.

TABLA II. Por ejemplo, un ejercicio psicofísico ejecutado a la máxima velocidad (v) posible, un "leg extension" (extensión de la pierna), puede generar un T_M de 537 J con una P_M de 1078 W. Y este ejercicio psicofísico ejecutado a una velocidad (v) muy lenta, genera el mismo T_M de 537 J, pero con una P_M de 67 W, un 94% inferior

Ejercicio psicofísico "leg extension"	F (N)	m (kg)	a (m/s ²)	v (m/s)	e (m)	t (s)	T_M (J)	P_M (W)	T_{MT} (J)	P_{MT} (W)	E (kcal)	E (W)
1R (máxima v posible)	736	75	9,81	1,46	0,73	0,5	537	1074	2254	4508	0,13	0,15
5R (máxima v posible)							3545		14876		0,85	0,98
1R (v muy lenta)				0,09		8	537	67	2254	282	0,13	0,15
5R (v muy lenta)							3545		14876		0,85	0,98

La energía potencial gravitacional (E_{pg}) no está relacionada con el desplazamiento de los cuerpos, sino con la aptitud que tienen los cuerpos de generar determinadas fuerzas, dependiendo de su situación dentro de un espacio gravitatorio:

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h$$

E_{pg} (J) = energía potencial gravitacional; m (kg) = masa del cuerpo; g (m/s²) = aceleración de la gravedad; h (m) = altura del cuerpo

La energía potencial elástica (E_{pe}) es la capacidad de T_M almacenada como consecuencia de la deformación de un objeto elástico, tal como el estiramiento de un muelle. Es igual a T_M realizado para estirar el muelle, que depende de la constante de proporcionalidad k^{18} y también de la distancia estirada. La fuerza requerida para estirar el muelle es directamente proporcional a la cantidad de estiramiento: se necesita dos veces la fuerza para estirarlo dos veces su longitud:

$$E_{pe} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot dx^2$$

E_{pe} (J) = energía potencial elástica; k (N/m) = constante de proporcionalidad; dx = distancia

B) La potencia mecánica

La P_M es el producto de la fuerza aplicada por la velocidad (energía mecánica). La P_M de un

movimiento circular (en dos dimensiones) es la relación entre el T_M desarrollado y el intervalo de tiempo (dt) invertido en realizarlo:

$$P_M = \frac{T_M}{dt}$$

P_M = potencia mecánica; T_M = trabajo mecánico; dt = intervalo de tiempo

En cambio, la P_M de un movimiento rectilíneo puede expresarse como el producto de la fuerza (F) por la velocidad (v), porque la fuerza y el desplazamiento son paralelos. El desplazamiento, expresado en metros (m), es el resultado (vector) de calcular la posición final menos la posición inicial. Y la distancia, también expresada en metros (m), es la longitud de la trayectoria: $P_M = F \cdot v$.

La P_M es igual al T_M dividido entre el intervalo de tiempo (dt), producto de la fuerza resultante aplicada, por la velocidad, tal como se expresa a continuación:

$$P_M = \frac{T_M}{dt} = F \cdot \frac{\Delta x}{t} \rightarrow \frac{\Delta x}{t} = v \rightarrow F \cdot v = P_M$$

F = fuerza; Δx = desplazamiento; t = tiempo; v = velocidad

Medición del trabajo mecánico y la potencia mecánica

En el T_M solo se tiene en cuenta la componente fuerza, que actúa en la dirección del des-

18 Ley de Hooke: se hace evidente en la zona elástica (tensión y alargamiento unitario).

plazamiento del cuerpo. Este producto escalar nos permite obtener un número real de la operación de dos vectores. Así, el T_M es el producto escalar¹⁹ de dos vectores entre el valor de la fuerza (F), expresado en newtons (N), y el vector desplazamiento (Δx), expresado en metros (m). El coseno α es la razón del ángulo, que forman el desplazamiento con la fuerza aplicada. Pero si el coseno α es igual a 0, el T_M es igual a la fuerza por el desplazamiento:

$$T_M = F \cdot \Delta x \cdot \cos \alpha; T_M = F \cdot \Delta x$$

F = fuerza; Δx = desplazamiento; $\cos \alpha$ = coseno α

El T_M realizado por una fuerza constante, que actúa sobre un cuerpo y que se mueve con movimiento rectilíneo, lo definimos como el producto escalar de la fuerza por el desplazamiento: espacio recorrido en línea recta, desde la posición A hasta la posición B, medido en julios (J). Pero para conocer la eficacia de este T_M , la velocidad a la que se realiza este movimiento, hay que medirlo en julios por segundo (J/s) o también en vatios (W), que representa la cantidad de energía en julios (J) utilizada por segundo (s), llamada P_M .

Medir el T_M en julios (J) y la P_M en vatios (W) permite cuantificar la carga del entrenamiento con diferentes unidades de medida. También la energía producida por la P_M se puede medir en kilocalorías (kcal).

El T_M de un movimiento rectilíneo y de algún movimiento circular, cuando solo hay una articulación móvil, o de un movimiento de trayectorias curvilíneas, como en el arranque en halterofilia (habituales en el entrenamiento de la preparación física), se puede medir como la cantidad de T_M de una fuerza constante en desplazarse una distancia, o como la cantidad de T_M de una fuerza por unidad de tiempo: P_M . El T_M que una

fuerza es capaz de producir se codifica como intensidad. Y tantas veces como se repite este T_M se codifica como volumen, producto de las repeticiones (R) por las series (S) de los ejercicios.

Procedimiento para medir el T_M con la fórmula que se muestra en la figura 3.

Procedimiento para medir la P_M con la fórmula que se muestra en la figura 4.

En el entrenamiento deportivo el T_M se mide con la expresión valor cualitativo, que representa el concepto intensidad (expresa el tipo de T_M que es) y con la expresión valor cuantitativo, que representa el concepto volumen (no expresa el tipo de T_M que es). Pero el valor cualitativo de la intensidad y el valor cuantitativo del volumen son indicadores básicos de medida²⁰, una medida inespecífica del T_M , que ofrece una referencia de proporcionalidad (normalmente porcentual) de la valoración de este T_M . La cuantificación de la intensidad y del volumen necesita de un instrumento para la medición del T_M , un indicador específico de medida²¹, tomado como patrón de referencia, o de una composición de otros indicadores definidos previamente. Y la medición de este T_M dará un valor numérico, que cuantificará matemáticamente la intensidad y el volumen del T_M del entrenamiento. De este modo, se puede empezar a plantear de forma racional la dosificación de un T_M eficaz, que debe permitir iniciar el proceso psicofisiológico de adaptación, y provocar un efecto positivo del entrenamiento y también una mejora de la salud del deportista.

Los indicadores específicos de medida son las magnitudes físicas fundamentales y derivadas de la intensidad y del volumen, y las magnitudes fisiológicas de la intensidad (aquí se proponen las más accesibles para el entrenador). Cada indicador específico de medida lleva asociada su unidad de medida.

19 Un escalar es un número real, asociado a cualquier tipo de magnitud física, que es continua. Los escalares tienen magnitud pero no dirección, lo que los distingue de los vectores.

20 Los indicadores básicos de medida son la intensidad y el volumen de las cargas de trabajo de las sesiones de entrenamiento, una medida inespecífica. En el entrenamiento deportivo es necesario utilizar los indicadores específicos de medida (magnitudes físicas y fisiológicas), que permiten cuantificar el T_M y el T_{MP} , otorgándole un valor numérico estandarizado, una unidad de medida, a partir de un patrón de referencia y, de este modo, dosificar racionalmente la programación del entrenamiento.

21 La unidad de medida es el valor numérico estandarizado de una determinada magnitud.

$$T_M(J) = \underbrace{(F \cdot \Delta x)}_{\substack{\text{Energía} \\ \text{mecánica (E}_M\text{)}}} \cdot \underbrace{(((R-1) \cdot 0,4) + (R-1) + 1) \cdot S}_{((R-1) \cdot 0,4 + R) \cdot S}$$

$$E_M \cdot ((R-1) \cdot 0,4 + R) \cdot S$$

FIGURA 3. Medición del trabajo mecánico (T_M) en julios (J) de una fuerza (F) constante sobre un cuerpo en desplazarse una distancia (Δx) con un movimiento rectilíneo.

La fuerza (F), la aceleración (a), la velocidad (v = la distancia en relación con el tiempo) y la energía cinética (E_c) son las magnitudes físicas fundamentales de la intensidad, que representan los indicadores específicos de medida, y sus unidades de medida son valores numéricos: de la fuerza (F) en newtons (N), de la aceleración (a) en m/s^2 , de la velocidad (v) en m/s y de la energía cinética (E_c) en julios (J), por ejemplo, 450 N, 6 m/s^2 , 2 m/s , 900 J. Estos valores numéricos representan el volumen de la intensidad, un nuevo concepto para definir la intensidad de la carga. La cuantificación de la intensidad con una unidad de medida es el volumen de esta intensidad.

Los valores de la distancia recorrida y el desplazamiento solo coinciden cuando la trayectoria es una recta (movimiento rectilíneo). En un movimiento rectilíneo la distancia y el desplazamiento son equivalentes. En un movimiento circular, cuando solo hay una articulación móvil, o en un movimiento de trayectorias curvilíneas la distancia es siempre mayor que el desplazamiento.

La distancia (longitud de la trayectoria sin relación con el tiempo) es una magnitud física fundamental del volumen. Las repeticiones (R) y las series (S) de un ejercicio son magnitudes físicas derivadas del volumen. Sus unidades de medida son los valores numéricos en m o km (distancia), en un número natural (R y S), por ejemplo, 3000 m, 3 km, 6 R, 3 S. Estos valores numéricos representan la intensidad del volu-

$$P_M(W) = \underbrace{(F \cdot v)}_{\substack{\text{Potencia} \\ \text{mecánica (P}_M\text{)}}} \cdot \underbrace{(((R-1) \cdot 0,4) + (R-1) + 1) \cdot S}_{((R-1) \cdot 0,4 + R) \cdot S}$$

$$P_M \cdot ((R-1) \cdot 0,4 + R) \cdot S$$

FIGURA 4. Medición de la potencia mecánica (P_M) en vatios (W) de una fuerza (F) constante sobre un cuerpo por la velocidad (v) a la cual se mueve con un movimiento rectilíneo.

men, un nuevo concepto para definir el volumen de la carga. La cuantificación del volumen con una unidad de medida es la intensidad de este volumen. Además, existe un grado progresivo de esfuerzo a partir de la segunda R de una S, que también es necesario medir para cuantificar más exactamente el valor numérico del volumen (intensidad del volumen).

A la hora de utilizar las unidades de medida para elaborar las cargas de trabajo de las sesiones de entrenamiento, hay que tener en cuenta que en toda medida experimental se producen dos tipos de errores: del instrumental propio del material o sistema, que se utiliza para medir, y del proceso de medida. Por este motivo, la medida exacta no es tan importante como la aplicación de una relación de proporcionalidad de los datos obtenidos, a pesar de los inevitables errores de medida.

La intensidad y el volumen de las cargas de trabajo de las sesiones de entrenamiento mantienen una relación de interdependencia y de proporcionalidad inversa. La densidad²², entendida como la relación entre el tiempo de trabajo y el tiempo de recuperación, debe permitir el control de estas relaciones.

Para un gran número de autores, la intensidad es la variable principal que orienta y condiciona las adaptaciones al entrenamiento (Kraemer, Fleck & Deschenes, 1988; Gibala et al., 2006; Helgerud et al., 2007). La utilización incontrolada de la intensidad y del volumen puede

²² La densidad (ρ) es el intervalo entre el esfuerzo (carga del entrenamiento) y el tiempo de recuperación en un ejercicio durante una sesión de entrenamiento. También se identifica con el espacio de tiempo entre las sesiones y su distribución en el microciclo, mesociclo y macrociclo del entrenamiento.

Intensidad	Magnitudes físicas fundamentales	Fuerza (N, kg · m/s ²) Aceleración (m/s ²) Velocidad (m/s) Energía cinética (J, kg·m ² /s ²)
	Magnitudes físicas derivadas	Velocidad y ritmo de ejecución (m/s) Frecuencia (R/s, rpm, Hz) Densidad (s, min, h, d)
	Magnitudes fisiológicas	Frecuencia cardíaca (p/min) Frecuencia respiratoria (RPM, L/min) VO ₂ y VO ₂ máx (ml/kg/min, L/min)
Volumen	Magnitudes físicas fundamentales	Masa (kg) Tiempo (s, min) Longitud (m, km)
	Magnitudes físicas derivadas	Repeticiones (R) Series (S) Duración de las sesiones (h:m:s) Frecuencia de las sesiones (h, d)
Indicadores básicos de medida	Indicadores específicos de medida	Unidades de medida

FIGURA 5. Propiedades mesurables de las cargas de trabajo de las sesiones de entrenamientos: indicadores básicos de medida, indicadores específicos de medida y sus unidades de medida.

generar efectos y adaptaciones diferentes a las previsiones en el desarrollo de las capacidades psicofísicas del deportista.

Incremento progresivo de esfuerzo

Para entender el concepto de incremento progresivo de esfuerzo es necesario tener una referencia de otro concepto, la carga psicofísica máxima, codificada como 1RM, entendida como la máxima cantidad de peso (kg) que es capaz de mover o soportar el deportista una sola vez (1RM=100% de esfuerzo) en un ejercicio psicofísico. En la actualidad se utiliza el concepto de 1RM para evaluar la capacidad máxima de resistencia metabólica del deportista. Desde un punto de vista metodológico, 1RM se toma como referencia para sacar porcentajes de la carga psicofísica y elaborar los programas de entrenamiento.

La mayoría de autores de referencia coinciden en las siguientes proposiciones: a) 3RM=95% de esfuerzo; b) 5RM=90% de esfuerzo. El incremento progresivo de esfuerzo se fundamenta en el análisis de la relación de estas proposiciones. Para calcular el incremento progresivo de esfuerzo se toma la relación de la primera proposición y se argumenta de la siguiente

manera: el 95% de esfuerzo le corresponden 3RM. Entre el 95% y el 100% de esfuerzo hay un espacio de 5 intervalos (5int) de un 1% cada uno. En la primera R de cada S el incremento es 0. Y se calcula de la siguiente manera: $(3RM - 1R)/5int = 0,4$. Con la misma argumentación se toma la relación de la segunda proposición: $(5RM - 1R)/10int = 0,4$.

$$(RM - 1)/int = 0,4 \quad (RM - 1) = 0,4 \cdot int \quad RM = 0,4 \cdot int + 1$$

El incremento progresivo de esfuerzo es el grado de fatiga que soporta el deportista a partir de la segunda R en una S de un ejercicio psicofísico, y que se acumula cuantas más R y más S realiza. Este grado de fatiga se cuantifica con el valor 0,4 para cada R a partir de la segunda R de cada S y se codifica como constante F0,4. El valor 0,4 se multiplica por el total de R, menos la primera R de cada S, a este producto se le suman las R y el resultado se multiplica por las S, para cuantificar el valor numérico del volumen y la intensidad del volumen de la carga de entrenamiento.

Como se puede comprobar, el análisis de la relación de ambas proposiciones ofrecen el mismo resultado. Además, el incremento progresivo de esfuerzo, o constante F0,4, también

sirve para elaborar diferentes fórmulas para la predicción de las RM y SM en cada franja porcentual del 1RM, y también para la predicción del 1RM.

EL TRABAJO METABÓLICO Y LA POTENCIA METABÓLICA

A) El trabajo metabólico

El T_{MT} es la energía metabólica transferida a la contracción muscular y transformada en fuerza muscular. La contracción muscular es poco eficiente a la vez de transformar el T_{MT} en T_M . De la energía metabólica solo se aprovecha entre un 24-30% para transformarla en energía mecánica y el resto, entre un 76-70%, se transforma en calor. No deben confundirse los cambios de habilidad psicomotora debido al entrenamiento con la evaluación de la eficiencia del T_{MT} . Existe una relación lineal VO_2-T_{MT} muy consistente en toda la población tanto sedentaria como deportiva. Esto significa que la eficiencia del T_{MT} está condicionada en relación al tipo de T_M . Esta relación VO_2-T_{MT} no depende del nivel de entrenamiento, ni de la edad, ni del género, pero sí del peso corporal. Un aumento del peso corporal puede representar una desviación ascendente de unos 5,8 ml/min/kg en la relación VO_2-T_{MT} (Wasserman, 2005). Sedentarios y deportistas, ya sean jóvenes o mayores, hombres o mujeres, todos tienen una eficiencia del T_{MT} similar. Para medir la eficiencia del T_{MT} se utilizan ejercicios relativamente simples, que no dependan de la especialización técnica del deportista: ciclismo o carrera a pie.

La eficiencia del P_{MT} se valora con la relación lineal VO_2-T_{MT} (10 ml/min/watt, Wasserman et al., 2005), con el equivalente calórico del VO_2 en situación estable o *steady-state*²³ (4,96 kcal/L VO_2 en el $QR=0,95$) y la P_{MT} externa (0,014 kcal/min/watt de al menos dos ejercicios, Wasser-

man et al., 2005), que representa un 30% de la eficiencia del T_{MT} (Whipp & Wasserman, 1969; Wasserman & Whipp, 1975).

En cambio, la relación lineal VO_2-T_{MT} calculada a partir de la tabla de Zuntz del gasto calórico (Zuntz, 1901) es de 12,4 ml/min/watt y el equivalente calórico del VO_2 en situación estable o *steady-state*, de 4,85-5 kcal/L VO_2 en el $QR=0,84-1$, o calculada a partir del estudio de Wasserman (2005), representa en ambos casos un 24% de la eficiencia del T_{MT} (Wasserman & Whipp, 1975)²⁴.

La medida de la eficiencia del T_{MT} del 30% representa un valor estandarizado en condiciones controladas y con ejercicios relativamente simples. Pero en la práctica deportiva este valor varía, porque las condiciones de medición del entrenamiento y de la competición son incontrolables y los ejercicios complejos. De todos modos, en cualquier condición de T_M , la eficiencia del T_{MT} tiene poca variación porcentual y la trascendencia de la medida del T_M es poco significativa. Parece acertado utilizar el valor porcentual de un 24% para la valoración de la cantidad de T_{MT} a partir del T_M . Es necesario recordar que la eficiencia del T_{MT} no se ve afectada por la edad, el sexo o la preparación física. El VO_2 , que necesitan los grupos musculares durante la práctica deportiva, queda determinado por la cantidad de T_M realizado y el peso corporal del deportista.

B) La potencia metabólica

La P_{MT} de un movimiento es la mayor cantidad de energía química interna del organismo transformada en calor y T_{MT} desarrollado por el intervalo de tiempo invertido (dt) en realizarlo:

$$P_{MT} = \frac{T_{MT}}{dt}$$

23 Se denomina *steady-state* (situación estable) a partir del momento que se llega a una fase en que el VO_2 se estabiliza (equilibrio entre el VO_2 aportado y el gasto energético) en un ejercicio físico o psicofísico de intensidad moderada y constante.

24 La contracción muscular es poco eficiente al tiempo de transformar T_{MT} en T_M , solo se aprovecha entre un 24-30% (Wasserman & Whipp, 1975). En condiciones de medición controladas y ejercicios simples, la eficiencia del T_{MT} está relativamente fijada en un 30%.

TABLA III. Definición de abreviaturas

Magnitud	Símbolo	Unidad de medida	Magnitud	Símbolo	Unidad de medida
Energía	E	julio (J)	Masa	m	kilogramo (kg)
Energía mecánica	E_M	julio (J)	Fuerza	F	newton (N)
Energía metabólica	E_{MT}	julio (J)	Intensidad	I	W, J, kcal
Trabajo	T	julio (J)	Repetición	R	número natural
Trabajo mecánico	T_M	julio (J)	Serie	S	número natural
Trabajo metabólico	T_{MT}	julio (J)	Volumen	V	m, km, R, S
Potencia mecánica	P_M	vatio (W)	Kilocaloría	E_{MT}	kcal
Potencia metabólica	P_{MT}	vatio (W)	Consumo de oxígeno	VO_2	ml/min
Desplazamiento	Δx	metro (m)	Cociente respiratorio	QR	--
Longitud (distancia)	dx	metro (m)	Trifosfato de adenosina	ATP	kcal/mol
Tiempo	t	segundo (s)	Difosfato de adenosina	ADP	kcal/mol
Intervalo de tiempo	dt	segundo (s)	Energía cinética	E_c	julio (J)
Velocidad	v	m/s	Energía potencial elástica	E_{pe}	julio (J)
Aceleración	a	m/s ²	Energía potencial gravitacional	E_{pg}	julio (J)

Pero, si el T_{MT} es constante, la fórmula es más simple:

$$P_{MT} = \frac{T_{MT}}{t}$$

$$T_{MT} = \frac{T_M}{24\%} \quad P_{MT} = \frac{P_M}{24\%}$$

Medición del trabajo metabólico y la potencia metabólica

La ejecución de un ejercicio genera una cantidad de T_{MT} y también de T_M . Tal como se ha explicado anteriormente, la valoración de esta cantidad de T_{MT} se mide desde el resultado del T_M , que representa un 24% de la eficiencia del T_{MT} , obtenido de una forma indirecta del consumo de oxígeno (VO_2) a partir de la carga realizada. La siguiente fórmula matemática expresa la medición del T_{MT} y la P_{MT} :

CONCLUSIONES

Solo un 24% de la energía metabólica transferida a la contracción muscular se transforma en energía mecánica y genera fuerza muscular con el fin de transformarse en T_M y T_{MT} efectivo. El resto, un 76% de la energía metabólica, se transforma en calor. En función del tiempo que dura esta contracción (depende de la velocidad y el ritmo de ejecución del movimiento), la fuerza muscular se manifestará como un T_M de resistencia a la fuerza, cuando el ejercicio

se ejecuta a poca velocidad, y como un T_M de fuerza explosiva cuando el ejercicio se ejecuta a máxima velocidad. La velocidad es la variable más importante a la hora de valorar el tipo de sesión de entrenamiento y la cantidad de T_M y T_{MT} . El gasto energético producido por esa cantidad de T_M y T_{MT} se mide en kilocalorías (kcal) y la cantidad de T_M y T_{MT} por unidad de tiempo (P_M y P_{MT} , respectivamente) se mide en vatios (W). En la práctica, la medida de la P_M y P_{MT} permite una dosificación racional de la carga, un T_M y T_{MT} más eficaz, y elaborar una programación individualizada de las sesiones de entrenamiento con la finalidad de optimizar el rendimiento del deportista.

La fuerza muscular y la velocidad son inversamente proporcionales. La velocidad determina una menor o mayor implicación mecánica del ejercicio y la fuerza muscular, una mayor o menor implicación metabólica. En las sesiones de entrenamiento la medida y el control de estos dos parámetros, dirigidos por un comportamiento psicomotor, condicionará que la ejecución del ejercicio sea técnicamente correcta y bastante eficiente, como para que en el campo táctico alcance el rendimiento deseado.

También en el ámbito de la rehabilitación funcional y la readaptación al entrenamiento es aconsejable dosificar racionalmente la carga para alcanzar un T_M y T_{MT} más eficaz. La rehabilitación funcional y la readaptación al entrenamiento no dejan de ser un entrenamiento, entendido como proceso de acondicionamiento psicofísico, con el propósito de mejorar el rendimiento físico e intelectual. En cambio, el entrenamiento deportivo es un proceso psicopedagógico interdisciplinario de preparación psicofísica del deportista con el objetivo de mejorar su comportamiento psicomotor y de conseguir el máximo rendimiento en la competición.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gibala MJ, Little JP, Essen vanM, Wilkin GP, Burgomaster KA, Safdar A, Raha S, Tarnopolsky MA. Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *J Physiol.* 2006;575:901-911.
2. Goldspink G. Cellular and Molecular Aspects of Adaptation in Skeletal Muscle. Strength and power in sport. Ed. P. Komi. Blackwell Scientific Publication, London, 1992. pp. 211-229.
3. González Badillo JJ, Gorostiaga Ayestarán E. Fundamentos del entrenamiento de fuerza. Aplicación al alto rendimiento deportivo. Ed. Inde, Barcelona, 2002.
4. Häkkinen K. Adaptación neuromuscular al entrenamiento de la fuerza en hombres y mujeres. *PubliCE Standard.* Pid: 252; 2004.
5. Helgerud J, Høydal K, Wang E et al. Aerobic high-intensity intervals improve VO_{2max} more than moderate training. *Medicine and Science in Sports and Exercise.* 2007;39:665-671.
6. Izquierdo Redín M. Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte. Ed. Médica Panamericana, S/A, Madrid, 2008.
7. Kraemer WJ, Fleck SJ, Deschenes M. Exercise physiology corner: A Review: Factors in exercise prescription of resistance training. *National Strength and Conditioning Association Journal.* 1988;10(5):36-42.
8. Mirallas JA. El movimiento deportivo. Teoría general. Ed. Ergon, Barcelona, 2007. p. 94.
9. Tous Fajardo J. Nuevas tendencias en fuerza y musculación. Ed. Ergo, Barcelona, 1999. pp. 28-33.
10. Wasserman K, Hansen JE, Sue D, Stringer W, Whipp BJ. Principles of Exercise Testing & Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications, 4th Ed. Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins, 2005. p. 18.
11. Wasserman K, Whipp BJ. Exercise Physiology in Health and Disease. *Am Rev of Respir Dis.* 1975; 112(2):219-49.
12. Whipp BJ, Wasserman K. Efficiency of muscular work. *J Appl Physiol.* 1969;26:644.
13. Zintl F. Entrenamiento de la resistencia. Ediciones Martínez Roca, Barcelona, 1991, p.27.
14. Zuntz N. Pflügers. *Arch Physiol.* 1901;83:557.

