

PARÁMETROS DEL ENTRENAMIENTO CON ELECTROESTIMULACIÓN Y EFECTOS CRÓNICOS SOBRE LA FUNCIÓN MUSCULAR (II)

ELECTROMYOSTIMULATION TRAINING PARAMETERS AND CHRONIC EFFECTS ON MUSCLE FUNCTION (II)

EFECTOS CRÓNICOS DEL ENTRENAMIENTO CON EENM SOBRE LA FUNCIÓN MUSCULAR

En el entrenamiento con EENM se distinguen las corrientes de baja frecuencia (< 40 Hz), que se utilizan para la recuperación post-esfuerzo y para la mejora de los procesos aeróbicos, de las de alta frecuencia (> 40 Hz), que se utilizan en el entrenamiento de la fuerza muscular. En este segundo apartado se analizarán los efectos crónicos que produce el entrenamiento con corrientes de alta frecuencia sobre la función muscular.

Entrenamiento voluntario frente a entrenamiento con EENM

Entre los estudios que compararon los beneficios producidos por cada tipo de trabajo, Kubiak, et al.⁵² observaron que el entrenamiento voluntario isométrico de idénticas características al entrenamiento con EENM (tabla 2) mejoró la fuerza máxima isométrica un 43% respecto a un 33%, no constatándose diferencias significativas entre ambas ganancias. Igualmente, Venable, et al.¹⁰ estudiaron si el entrenamiento voluntario complementado con EENM podría incrementar la fuerza máxima y el salto vertical más que el entrenamiento voluntario (pesas). Tras 15 sesiones de entrenamiento ambos grupos mejoraron su fuerza máxima un 20.7%. De la misma forma, ambos grupos mejoraron el salto vertical (3% pesas+EENM y 7.5% pesas), no reflejándose diferencias entre las mejoras de ambos métodos de entrenamiento. Turostowski, et al.⁶⁶ reflejaron ganancias en la fuerza concéntrica tras 15 sesiones de EENM (Tabla 3), siendo éstas inferiores a las obtenidas por un entrenamiento voluntario de similares características. En último lugar, Herrero⁶⁷ no encontró diferencias signifi-

cativas entre las mejoras en dos grupos que entrenaron durante 16 sesiones en una máquina de extensión de cuádriceps (40.2% y 31.4%), suplementando el primero de los grupos su trabajo con EENM. Por lo tanto, parece ser que las ganancias obtenidas en la fuerza con la EENM en programas de entrenamiento inferiores a 5 semanas²⁸ o 6 semanas³², son similares pero no superiores a las logradas con entrenamiento voluntario de las mismas características. Así en personas sanas el entrenamiento voluntario parece ser más eficaz que la EENM para la mejora de la fuerza⁶⁵, posiblemente debido a las diferencias existentes en el control de la contracción por parte del sistema nervioso central entre ambos tipos de entrenamiento⁴⁶, así como por las diferencias fisiológicas entre los dos tipos de contracción (tabla 1). Por el contrario, en personas lesionadas la EENM es más eficiente que el entrenamiento voluntario para evitar la pérdida de la masa muscular⁶⁵.

EENM superpuesta sobre contracciones voluntarias

Desde un punto de vista teórico, la superposición de EENM sobre una contracción voluntaria podría reclutar un mayor número de unidades motrices que cualquiera de los dos tipos de contracción por separado y, en consecuencia, desarrollar una mayor fuerza. Existen dos técnicas para llevar a cabo la superposición⁶⁸: (i) la técnica *twitch interpolation* (TI); y (ii) la técnica de superposición percutánea de la EENM (SP). La diferencia entre ambas estriba en que con TI el estímulo eléctrico se aplica sobre el nervio y principalmente se utiliza como técnica de evaluación, mientras que con SP el estímulo eléctrico se aplica a través de electrodos colocados sobre el vientre muscular y esencialmente se utiliza como técnica de entrenamiento.

J. Azael
Herrero
Alonso¹

Olaia
Abadía
García
de Vicuña¹

Juan Carlos
Morante
Rábago²

Juan García
López²

¹Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Europea Miguel de Cervantes
²Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte de la Universidad de León

	Contracción voluntaria	EENM	Observaciones
Reclutamiento de UM	- <i>Precoz, fibras tipo I</i> - <i>Fibras tipo IIa</i>	- <i>Sin prioridad</i> - <i>Espacialmente constante</i>	<i>Depende de la proximidad al electrodo de las ramas terminales de los axones neurales</i>
Frecuencia de descarga de las UM	- <i>Asincrónica</i>	- <i>Sincrónica</i>	<i>En el entrenamiento de fuerza la sincronización puede ser útil ocasionalmente</i>
Respuesta al estímulo de las UM	- <i>No es simultánea con la contracción</i> - <i>Periodos refractarios no unísonos</i>	- <i>Simultaneidad de la contracción</i> - <i>Periodos refractarios unísonos</i>	
Fatiga muscular precoz	<i>No</i>	<i>Sí</i>	<i>Consecuencia de:</i> - <i>Patrón diferente</i> - <i>Descarga sincrónica</i> - <i>Falta de entrenamiento</i>
Posibilidad de tetanización	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>	<i>El incremento de la intensidad y duración del estímulo y la frecuencia en EENM propician esta posibilidad</i>

TABLA 1.
Características de la contracción muscular durante una acción voluntaria y otra inducida por EENM (Modificada de Rodríguez y Gus¹⁰).

En contracciones isométricas y concéntricas se ha observado que la superposición mediante las técnicas TI^{69,70} o SP^{49,71-74} produce menos fuerza que en contracciones voluntarias, algo que puede ser debido, en parte, a la co-activación de la musculatura antagonista durante la aplicación de EENM en los tests máximos⁷⁷. Únicamente bajo contracciones excéntricas se han obtenido mayores niveles de fuerza con técnicas de superposición^{59,77}. Según estos trabajos, la fuerza desarrollada en acciones voluntarias excéntricas puede estar limitada por un mecanismo de inhibición neural que protege a la musculatura de generar una tensión extrema.

La aplicación de TI sobre acciones complejas (*squat jump*) tampoco produjo una mejora del rendimiento⁷⁵, principalmente debido a la necesidad de realizar una correcta coordinación intermuscular en este tipo de acciones⁷⁶.

Fuerza isométrica

Está ampliamente aceptado que la EENM mejora la fuerza máxima isométrica (Δ , Tabla 2), siempre y cuando la fuerza producida por la corriente sea superior al 33% de la FMI¹².

Algunos de los resultados expuestos en la tabla 2 hay que observarlos con cautela. Por ejemplo, en el estudio de Selkowitz⁴² el grupo control también incrementó de manera significativa su FMI (18%), no obstante, sí que existen diferencias significativas entre los incrementos de ambos grupos. En el estudio de Valli, et al.⁸¹ se observa una mejora del 19% en la FMI, sin embargo este estudio carece de grupo control. Colson, et al.²², pese a reflejar mejoras en la FMI del bíceps braquial, observaron una disminución de fuerza de la musculatura antagonista. Por el contrario, Martin, et al.¹³ estimularon el tríceps sural en una posición de flexión

TABLA 2. Esquema de estudios que analizaron la influencia del entrenamiento con EENM en la fuerza máxima isométrica (FMI).

AUTOR	MÚS.	ÁNG (°)	AI(ms)/Fr (Hz)	PROG.(*)	INT.	Δ
Selkowitz ⁴²	Q	120	450 / 50	12·10·10·120	M.T.	+44%
Kubiak et al. ⁵²	Q					
	I	120	¿?	15·10·15·50	M.T.	Q+33% I+12%
Portmann y Montpetit ⁷⁸	Q	90	400 / 100	24·10·10·50	M.T.	+21.4%
Miller y Thépaut-Mathieu ¹²	BB	155	200 / 90	15·25·5·30	M.T.	+15.6%
Martin et al. ¹³	TS	Fdmáx	200 / 70	12·30·5·15	63%MCV	+10.3%
Pichon et al. ⁷⁹	DA	140	300 / 80	9·27·6·20	60%MCV	+21%
Van Gheluwe y Duchateau ⁴	Q	Dinámico	120 / 50	15·(10x10)·2·120		
				10 series de 10 rep.	M.T.	+22%
Colson et al. ²²	BB	90	240 / 80	21·30·6·180	60-70% MCV	+33% a 120° +47.5% a 60°
Maffiuletti et al. ²⁴	Q	120	400 / 100	12·48·3·17	80%MCV	+31.2% a 65° +32.5% a 55°
Maffiuletti et al. ⁸⁰	G	90	400 / 75	16·45·4·20	M.T. (50-70% MCV)	+8.1% a 90°
Maffiuletti et al. ²⁵	Q					
	G	110	400 / 115-120	12·48/30·3·17	≥60% MCV	+28.5%
Valli et al. ⁸¹	Q	120	¿? / 60-90	11·81·7·15	M.T.	+19%
Porcari et al. ⁸²	ABD	Libre	200/50-70	40·130-160·6.5-9.5·2.5-5.5	M.T.	+58%
Gondin et al. ⁸³	Q	120	400 / 75	32·40·6.25·20	M.T. (47-93% MCV)	+27%
Herrero et al. ⁸⁴	Q	120	400 / 120	16·53·3·30	M.T.	+7.1%

Mús = músculo; ÁNG = ángulo de entrenamiento; AI = ancho de impulso; Fr = frecuencia; Prog = programa de entrenamiento; (*) = n° sesiones · n° contracciones · tiempo de contracción · tiempo de reposo; Int = intensidad de aplicación de la EENM durante el entrenamiento; Q = cuádriceps; I = isquiotibiales; BB = bíceps braquial; TS = tríceps sural; DA = dorsal ancho; G = gastrocnemio; ABD = abdominales; Fdmáx = flexión dorsal máxima; rep = repeticiones; M.T. = máxima tolerable; MCV = máxima contracción voluntaria.

dorsal forzada durante las sesiones de EENM observándose ganancias en la FMI del tríceps sural, y unas ganancias superiores en flexión dorsal (33.8%). Estas observaciones muestran la importancia de controlar el grado de activación de la musculatura antagonista durante las sesiones de entrenamiento con EENM siempre que sea posible.

Fuerza dinámica

Tal y como sucede con la FMI, diferentes estudios han documentado la eficacia que tiene el entrenamiento con EENM para la mejora de la fuerza dinámica en condiciones isocinéticas bajo modalidades de contracción concéntrica y excéntrica (Tabla 3). Especialmente, estas mejoras son más acentuadas bajo condiciones excéntricas y bajo condiciones concéntricas a elevadas velocidades.

Potencia anaeróbica en saltos verticales

La mayoría de estudios que evalúan la fuerza explosiva utilizan diferentes test de salto vertical como principal estimador de esta cualidad. Así, se ha reflejado que el entrenamiento con EENM empeora^{85,87,88} o no modifica⁸⁴ la altura del salto vertical. Cuando se ha comparado el entrenamiento de pesas con un entrenamiento combinado de pesas y EENM, no se han reflejado mayores beneficios con el trabajo combinado que con el propio trabajo de pesas por sí solo^{10,67,89}. Por lo tanto, no existe ningún trabajo que afirme que el entrenamiento con EENM por sí solo suponga una mejora en la altura del salto vertical.

Por el contrario, varios estudios que no utilizaron la EENM como único método de entrenamiento, y la combinaron con trabajo voluntario en el que predominaba la realización de saltos

AUTOR	MÚS.	AI(ms)/Fr (Hz)	PROG.(*)	INT.	Δ
Kubiak et al. ⁵²	Q		15·10·15·50	M.T.	Q +7.7% a 60°·s ⁻¹
Portmann y Montpetit ⁷⁸	Q	400 / 100	24·10·10·50	M.T.	+13.3% a 15°·s ⁻¹
Turostowski et al. ⁶⁶	Q	100 / 60	15·30·5·15	44%MCV	+17.6% a 180°·s ⁻¹
Martin et al. ¹³	TS	200 / 70	12·30·5·15	63%MCV	+9.4% a 30°·s ⁻¹
Pichon et al. ⁷⁹	DA	300 / 80	9·27·6·20	60%MCV	+5.6% a 60°·s ⁻¹
Ruther et al. ⁹⁴	Q	500 / 50	18·5x10·1·2	70%MCV	+26.5% a 60°·s ⁻¹
Van Gheluwe y Duchateau ⁴	Q	120 / 50	15·(10x10)·2·120	M.T.	+8.1% a 360°·s ⁻¹
Colson et al. ²²	BB	240 / 80	21·30·6·180	60-70% MCV	+10.3% a 180°·s ⁻¹
Maffiuletti et al. ²⁴	Q	400 / 100	12·48·3·17	80%MCV	+14.4% a 300°·s ⁻¹
Stevenson y Dudley ⁹⁵	Q	200 / 70	16·3-5x10·1·4	70%MCV	+14.7% a 360°·s ⁻¹
Maffiuletti et al. ⁸⁰	G	400 / 75	16·45·4·20	M.T.	+24.1% a -60°·s ⁻¹
Brocherie et al. ⁸⁰	Q	250 / 85	9·30·4·20	(50-70% MCV)	+53% a 75 °·s ⁻¹
				M.T.	+60% a -75 °·s ⁻¹
				60% MCV	+22.5% a 60°·s ⁻¹
					+19.3% a -60°·s ⁻¹
					+6.9% a 30°·s ⁻¹
					+10% a 120°·s ⁻¹
					+11.4% a -60°·s ⁻¹
					+18.5% a -240°·s ⁻¹
					+43% a 360°·s ⁻¹
					+36% a 300°·s ⁻¹
					+30% a 240°·s ⁻¹
					+32% a 180°·s ⁻¹
					+29% a -120°·s ⁻¹
					+37% a -60°·s ⁻¹
					+54% a 70°·s ⁻¹
					+28% a -70°·s ⁻¹
					+10.8% a 60°·s ⁻¹
					+13.1% a -120°·s ⁻¹
					+41.3% a 60°·s ⁻¹
					+49.2% a 300°·s ⁻¹
					+24.2% a -60°·s ⁻¹
					+37.1% a -120°·s ⁻¹

TABLA 3. Esquema de estudios que analizaron la influencia de la EENM en la fuerza máxima dinámica (FMD).

Consultar abreviaturas en tabla 2

verticales (baloncesto, pliometría o voleibol), encontraron mejoras en el salto vertical^{24,25,27,84}. Este trabajo voluntario complementario pudo suplir la disminución de la elasticidad muscular producida por la propia EENM^{87,90} a la vez que implicó un entrenamiento del patrón de reclutamiento habitual de la musculatura.

Potencia anaeróbica en la carrera de velocidad

Son muy pocos los trabajos que han analizado la influencia de la EENM sobre la velocidad.

Además, varios de ellos no utilizan gestos naturales para evaluar esta cualidad analizando el tiempo de activación de la musculatura con técnicas EMG^{9,46}. Mientras que el segundo de estos trabajos⁴⁶ no se observó ningún beneficio, en el primero⁹ se constató un aumento del 15% en la velocidad de contracción muscular. La diferencia entre ambos resultados se puede deber al ciclo útil utilizado, ya que para incrementar la velocidad de contracción es necesario ajustar los periodos de contracción y reposo, así como la intensidad, a la fisiología muscular. De esta forma, es necesario respetar largos periodos de

reposo tras breves estimulaciones intensas para que se repongan los depósitos de fosfocreatina y ATP, entrenando así los procesos metabólicos que se van a demandar durante acciones de velocidad.

Utilizando gestos más naturales para medir la velocidad, Brocherie, et al.⁸⁵ reflejaron una mejora en el tiempo de carrera en 10 m de patinadores de hockey sobre hielo de un 4.8% tras 9 sesiones de EENM del cuádriceps femoral. Por otro lado, Pichon, et al.⁷⁹ estudiaron la influencia del entrenamiento del dorsal ancho con EENM (Tabla 2) en los tiempos de nado, mejorándose el rendimiento en 25 y 50 m (1.33% y 1.45%, respectivamente). Esta mejora del tiempo de nado se achacó a una mayor amplitud de brazada (2.4%). En último lugar, Herrero, et al.⁸⁴ constataron una mejora de un 2.4% en el tiempo de carrera a pie en 20 m tras un entrenamiento combinado de EENM y pliometría (tabla 2). Por lo tanto, tal y como sucede con la potencia anaeróbica en saltos verticales, para que la EENM suponga un beneficio en las diferentes carreras de velocidad, es necesario llevar a cabo un trabajo de transferencia específico en función del tipo de test utilizado para evaluar la velocidad.

Adaptaciones neurales

Si la EENM mejora la fuerza máxima, es lógico que se produzcan algún tipo de adaptaciones a nivel neural y/o estructural. Las técnicas más utilizadas para analizar las adaptaciones neurales producidas por el entrenamiento con EENM son: 1) medir el porcentaje de activación muscular mediante la técnica *twitch interpolation* (TI); y 2) analizar la raíz cuadrada media (*RMS, root mean square*) de los valores electromiográficos durante una contracción isométrica voluntaria máxima.

Tal y como se ha comentado en el apartado sobre superposición, la técnica TI consiste en aplicar un estímulo eléctrico supramáximo sobre el tronco neural o las ramas neurales intramusculares de un músculo durante una contracción máxima voluntaria, así aquellas unidades motrices que todavía no se han reclutado se excitan generando una ten-

sión superior⁹¹. Posteriormente se compara la fuerza ganada durante la superposición de la EENM respecto de la fuerza generada por el mismo estímulo en situación de reposo, obteniéndose el porcentaje de activación de unidades motrices que es capaz de realizar un sujeto de forma voluntaria.

La EMG es la segunda técnica utilizada para evaluar las posibles adaptaciones neurales producidas por el entrenamiento. En este caso, se analiza la relación entre el valor pico de la *RMS* durante una MCV, normalizada respecto al valor de la *M-wave* en situación de reposo⁹². La *M-wave* es la respuesta electromiográfica debida a la activación sincrónica de un conjunto de unidades motrices como respuesta a un estímulo eléctrico. Si el cociente *RMS/M-wave* se modifica con el entrenamiento, entonces se puede hablar de la existencia de adaptaciones neurales. Cuando se observa un incremento en la *RMS* y la *M-wave* no se modifica, se habla de adaptaciones a nivel central (por encima de la unión neuromuscular), mientras que si se incrementa la *M-wave* y no se modifica la *RMS* se habla de adaptaciones a nivel periférico (en la unión neuromuscular o por debajo de ella).

Estas dos técnicas descritas han sido utilizadas en diferentes estudios que han constatado la existencia de adaptaciones neurales en programas de entrenamiento de EENM de duraciones cercanas a las 4 semanas. Así, tras 4 semanas de entrenamiento con EENM, Maffiuleti, et al.⁸⁰ constataron un incremento significativo en la fuerza máxima isométrica de los flexores plantares, el cual fue acompañado por un incremento del cociente *RMS/M-wave* del soleo. Gondin, et al.⁸³ observaron tras 4 semanas de entrenamiento con EENM una ganancia en la MCV (15%) acompañada de un incremento en el porcentaje de activación muscular (5%) (TI), no observándose modificaciones significativas a nivel estructural en la musculatura.

Se ha sugerido que para que la EENM induzca cambios significativos en la morfología muscular las intensidades utilizadas deberían producir contracciones superiores al 60% de la MCV⁴³,

aunque este tipo de adaptaciones suelen suceder en periodos de entrenamiento superiores a 5 o 6 semanas³². Por este motivo, las ganancias de fuerza producidas en periodos de entrenamiento inferiores se achacan a factores neurales^{13,24,25,32,80} tal y como defiende el modelo de Sale⁹³. De esta forma, los beneficios en la fuerza no son sólo el resultado de cambios intracelulares, sino también de una mejora de la sincronización de las unidades motrices³².

Adaptaciones estructurales

Los estudios que entrenaron con EENM durante un periodo superior a 4 semanas constataron incrementos en la masa muscular^{66,83,94,95}. Así, Turostowski, et al.⁶⁶ observaron mediante tomografía axial computerizada (TAC) un aumento del área de sección transversal (CSA) del 8% tras 5 semanas de entrenamiento con EENM (tabla 3). Ruther, et al.⁹⁴, mediante resonancia magnética (RMN) observaron incrementos del 10% en el CSA tras 9 semanas de entrenamiento con EENM (tabla 3). Stevenson y Dudley⁹⁵ observaron mediante RMN incrementos del 9.8% en la masa muscular tras 8 semanas de entrenamiento con EENM (tabla 3). Por último, Gondin, et al.⁸³ constataron mediante ecografía un incremento del CSA del 6% y del ángulo de peneación del 14% tras 8 semanas de entrenamiento con EENM (tabla 2), no observándose modificaciones significativas en la masa muscular tras 4 semanas de entrenamiento con EENM. El único estudio en el que se constató un incremento de la masa muscular en un periodo de entrenamiento inferior a 4 semanas, fue el de Cabric, et al.³⁸, quienes observaron mediante biopsias pre- y post- EENM un aumento del área de sección transversal de las fibras musculares del 20% tras 19 sesiones de entrenamiento.

¿Por qué razón la EENM produce hipertrofia muscular? En el entrenamiento voluntario de elevada intensidad y escasa duración se ha observado que la musculatura esquelética se activa de manera asincrónica, con el objetivo de

minimizar la demanda metabólica. Cuando el mismo protocolo de ejercicio es aplicado mediante EENM, las mismas fibras musculares son activadas repetidamente, lo que exagera la demanda metabólica y ocasiona fatiga. Por todo esto, algunos autores han reflejado que la fatiga es substancialmente mayor para una determinada carga de trabajo con EENM respecto al trabajo voluntario⁵⁴. Así, la EENM impone un estrés mecánico en una zona determinada de la musculatura que a medio plazo produce hipertrofia, pero que a su vez, compromete la habilidad para mantener los niveles de fuerza durante el entrenamiento^{16,94}.

CONCLUSIONES

La EENM no debe considerarse como un método de entrenamiento alternativo, sino complementario al entrenamiento voluntario. En su utilización, siempre que se configuren los parámetros de la corriente de una forma lógica según lo expuesto en esta revisión se podrán mejorar diferentes facetas de la condición física.

Parece ser que las mejoras obtenidas en la fuerza en programas de entrenamiento voluntario son superiores a las logradas con entrenamientos con EENM de características similares, habiendo pocos estudios que hayan comparado ambos métodos de entrenamiento. No obstante, la EENM se muestra como un método eficiente en el aumento de la fuerza máxima isométrica y dinámica, sin que se haya descrito qué tipo de entrenamiento con EENM (isométrico, dinámico, combinado con otros métodos) puede resultar más efectivo en la mejora de estas cualidades. En periodos de entrenamiento de menos de 4 semanas de duración, las mejoras en la fuerza muscular se deben a adaptaciones producidas a nivel neural.

La EENM por sí sola no mejora de la potencia anaeróbica durante saltos verticales ni la carrera de velocidad. Para mejorar estas cualidades con EENM se debe realizar un trabajo de transferencia específico dependiendo de cada cualidad.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar cómo influye la modificación de los parámetros del entrenamiento con estimulación eléctrica neuromuscular (EENM) sobre el rendimiento físico, y revisar los efectos crónicos que produce este método de entrenamiento en diferentes facetas de la condición física. En el artículo se muestran los valores óptimos que deben tener estos parámetros para la mejora de la fuerza muscular y las premisas que se deben seguir para mejorar la potencia anaeróbica. Se debe saber que utilizar la EENM como único método de entrenamiento puede resultar perjudicial en determinadas cualidades físicas.

Palabras Clave: Protocolos de entrenamiento. Revisión. Fuerza. Salto vertical. Velocidad. Adaptaciones neurales. Adaptaciones estructurales.

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the influence of the electric current parameters modification with electromyostimulation (EENM) training on physical performance, and to review the chronic effects produced by this training method on different aspects of muscle function. The article shows the optimum values of these parameters in order to improve muscle strength and anaerobic power. It must be known that the use of EENM as only training method can be harmful on some qualities.

Key Words: Training protocols. Review. Strength. Vertical jump. Velocity. Neural adaptations. Structural adaptations.

B I B L I O G R A F Í A

- Martínez M, Pastor JM, Sendra F.** Manual de medicina física. Ed Harcourt Brace, Madrid, 1997.
- Hultman E, Sjöholm H, Jäderholm-Ek I, Krynicki J.** Evaluation of methods for electrical stimulation of human skeletal muscle in situ. *Pflugers Arch* 1983; 398: 139-141.
- Ward AR, Shkuratova N.** Russian Electrical Stimulation: The Early Experiments. *Phys Ther* 2002; 82(10): 1019-1030.
- Van Gheluwe C, Duchateau J.** Effects de la superposition de l'électrostimulation à l'activité volontaire au cours d'un renforcement musculaire en mode isométrique. *Am Kinésithér* 1997; 24(6): 267-274.
- Herrero JA, García J.** Análisis y valoración de los efectos del entrenamiento con estimulación eléctrica neuromuscular. *Rendimientodeportivo.com* N°3, 2002 disponible en <http://www.rendimientodeportivo.com/N003/Artic013.htm> [Consulta 2/4/2006]
- Laufer Y, Ries JD, Leininger PM, Alon G.** Quadriceps femoris muscle torques and fatigue generated by neuromuscular electrical stimulation with three different waveforms. *Phys Ther* 2001; 81(7): 1307-1316.
- Siff M.** Applications of electrostimulation in physical conditioning: A review. *J Appl Sport Sci Res* 1990; 4(1): 20-26.
- Stefanovska A, Vodovnik L.** Change in muscle force following electrical stimulation. Dependence on stimulation waveform and frequency. *Scand J Rehabil Med* 1985; 7(3): 141-146.
- Karba R, Stefansovska A, Dordevic S.** Human skeletal muscle: phasic type of electrical stimulation increases its contractile speed. *Ann Biomed Eng* 1990; 18(5): 479-490.
- Venable MP, Collins MA, O'Bryant HS, Denegar CR, Sedivec MJ, Alon G.** Effect of supplemental electrical stimulation on the development of strength, vertical jump performance and power. *J Appl Sport Sci Res* 1991; 5(3): 139-143.
- Bigard AX, Lienhard F, Merino D, Serrurier B, Guezennec CY.** Effects of surface electrostimulation on the structure and metabolic properties in monkey skeletal muscle. *Med Sci Sports Exerc* 1993; 25(3): 355-362.
- Miller C, Thépaut-Mathieu C.** Strength training by electrostimulation conditions for Efficacy. *Int J Sports Med* 1993; 14(1): 20-28.
- Martin L, Cometti G, Pousson M, Morlon B.** The influence of electrostimulation on the mechanical and morphological characteristics of the triceps surae. *J Sports Sci* 1994; 12(4): 377-381.
- Koutedakis Y, Frischknecht R, Vrbová G, Craig NC, Bugdett R.** Maximal voluntary quadriceps strength patterns in Olympic overtrained athletes. *Med Sci Sport Exerc* 1995; 27(4): 566-572.
- Eijsbouts XH, Hopman MT, Skinner JS.** Effect of electrical stimulation of leg muscles on physiological

responses during arm-cranking exercise in healthy men. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1997; 75(2): 177-181.

16. **Matheson GOM, Dunlop RJ, McKenzie DC, Smith CF, Allen PS.** Force output and energy metabolism during neuromuscular electrical stimulation: a ³¹P-NMR Study. *Scand J Rehab Med* 1997; 29: 175-180.
17. **Faghri PD, Votto JJ, Hovorka CF.** Venous hemodynamics of the lower extremities in response to electrical stimulation. *Arch Phys Med Rehabil* 1998; 79(7): 842-848.
18. **Alon G, Kantor G, Smith GV.** Peripheral nerve excitation and plantar flexion force elicited by electrical stimulation in males and females. *J Orthop Sports Phys Ther* 1999; 29(4): 218-224.
19. **Briglia S, Verardi L, Mondardini P, Tanzi R, Drago E, Maietta PL, Tentoni C.** Studio sull'impiego di apparecchiature per elettrostimolazione nell'allenamento della forza del muscolo quadricipite femorale. *Medicina dello Sport* 1999; 52(4): 243-260.
20. **Vanderthommen M, Gilles R, Carlier P, Ciancabilla F, Zahlan O, Sluse F, Crielaard JM.** Human Muscle energetics during voluntary and electrically induced isometric contractions as measured by ³¹P-NMR spectroscopy. *Int J Sports Med* 1999; 20(5): 279-283.
21. **Coarasa A, Moros T, Marco C, Mantilla C.** Beneficio potencial de la electroestimulación neuromuscular del cuádriceps femoral para el fortalecimiento. *Archivos de Medicina del Deporte* 2000; 17(79): 405-412.
22. **Colson S, Martin A, Cometti G, Van Hoecke J.** Re-examination of training by electrostimulation in human elbow musculoskeletal system. *Int J Sports Med* 2000; 21(4): 281-288.
23. **Herrero JA, Izquierdo M, Maffiuletti NA, García J.** Electromyostimulation and Plyometric Training Effects on Jumping and Sprint Time. *Int J Sports Med* (En prensa).
24. **Maffiuletti NA, Cometti G, Amiridis IG, Martin A, Pousson M, Chatard JC.** The effects of electrostimulation training and basketball practice on muscle strength and jumping ability. *Int J Sports Med* 2000; 21(6): 437-443.
25. **Maffiuletti NA, Dugnani S, Folz M, Di Pierno E, Mauro F.** Effect of combined electrostimulation and plyometric training on vertical jump height. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34(10): 1638-1644.
26. **Maffiuletti NA, Pensini M, Scaglioni G, Ferri A, Ballay Y, Martin A.** Effect of electromyostimulation training on soleus and gastrocnemii H- and T-reflex properties. *Eur J Appl Physiol* 2003; 90(5-6): 601-607.
27. **Malatesta D, Cattaneo F, Dugnani S, Maffiuletti NA.** Effects of electromyostimulation training and volleyball practice on jumping ability. *J Strength Cond Res* 2003; 17(3): 573-579.
28. **Enoka RM.** Muscle strength and its development. New perspectives. *Sports Med* 1988; 6(3): 146-168.
29. **Holcomb WR.** A practical guide to electrical therapy. *J Sport Rehab* 1997; 6(3): 272-282.
30. **Lake DA.** Neuromuscular electrical stimulation. An overview and its application in the treatment of sport injuries. *Sports Med* 1992; 13(5): 320-336.
31. **Coarasa A, Moros MT, Ros R, Vilarroya A.** Cronaxias en el ejercicio. *Archivos de Medicina del Deporte* 1995; 12(48): 263-268.
32. **Hainaut K, Duchateau J.** Neuromuscular Electrical stimulation and voluntary exercise. *Sports Med* 1992; 14(2): 100-113.
33. **Bigard AX, Canon F, Guezennec CY.** Conséquences histologiques et métaboliques de l'électromyostimulation. *Revue de la littérature. Sci Sport* 1991; 6(4): 272-292.
34. **Galea V.** Electrical characteristics of human ankle dorsi- and plantar-flexor muscles. Comparative responses during fatiguing stimulation and recovery. *Eur J Appl Physiol* 2001; 85: 130-140.
35. **Child RB, Brown SJ, Day SH, Saxton JM, Donnelly AE.** Manipulation of knee extensor force using percutaneous electrical myostimulation during

- eccentric actions: effects on indices of muscle damage in humans. *Int J Sports Med* 1988; 19(7): 468-473.
36. **Mela P, Veltink PH, Huijing PA.** The influence of stimulation frequency and ankle joint angle on the moment exerted by human dorsiflexor muscles. *J Electromyogr Kines* 2001; 11(1): 53-63.
 37. **Binder-Macleod SA, Halden EE, Jungles KA.** Effects of stimulation intensity on the physiological responses of human motor units. *Med Sci Sports Exerc* 1995; 27(4): 556-565.
 38. **Cabric M, Appell HJ.** Effect of electrical stimulation of high and low frequency on maximum isometric force and some morphological characteristics in men. *Int J Sports Med* 1987; 8(4): 256-260.
 39. **Cabric M, Appell HJ, Resic A.** Stereological analysis of capillaries in electrostimulated human muscles. *Int J Sports Med* 1987; 8(5): 327-330.
 40. **Cabric M, Appell HJ, Resic A.** Fine structural changes in electrostimulated human skeletal muscle. *Eur J Appl Physiol* 1988; 57(1): 1-5.
 41. **Keller BA, Katch FI.** Transcutaneous electrical muscle stimulation does not alter regional arm adiposity and muscularity. *Am J Human Biol* 1998; 10: 317-326.
 42. **Selkowitz DM.** Improvement in isometric strength of the quadriceps femoris muscle after training with electrical stimulation. *Phys Ther* 1985; 65(2): 186-196.
 43. **Rich NC.** Strength training via high frequency electrical stimulation. *J Sports Med Phys Fit* 1992; 32(1): 19-25.
 44. **Herrero JA, García-López D, García-López J.** Influencia del entrenamiento con estimulación eléctrica neuromuscular en la fuerza y la velocidad: su aplicabilidad al ámbito del rendimiento deportivo. *Revista de Entrenamiento Deportivo (R?D)* 2003; 17(1): 13-22.
 45. **Delitto A.** "Russian electrical stimulation": putting this perspective into perspective. *Phys Ther* 2002; 82(10): 1017-1018.
 46. **Duchateau J, Hainaut K.** Electrical and mechanical failures during sustained and intermittent contractions in humans. *J Appl Physiol* 1985; 58(3): 942-947.
 47. **Lieber RL, Kelly MJ.** Torque history electrically stimulated human quadriceps implications for stimulation therapy. *J Orthop Res* 1993; 11: 131-141.
 48. **Brocherie F, Babault N, Cometti G, Maffiuletti N, Chatard JC.** Electrostimulation training effects on the physical performance of ice hockey players. *Med Sci Sports Exerc* 2005; 37: 455-460.
 49. **Hortobágyi T, Lambert NJ, Tracy C, Shinebarger M.** Voluntary and electromyostimulation forces in trained and untrained men. *Med Sci Sports Exerc* 1991; 24(6): 702-707.
 50. **Delitto A, Brown M, Strube MJ, Rose SJ, Lehman RC.** Electrical stimulation of quadriceps femoris in an elite weight lifter: a single subject experiment. *Int J Sports Med* 1989; 10(3): 187-191.
 51. **Trnkoczy A.** Functional electrical stimulation of extremities: its basis, technology and role in rehabilitation. *Automedica* 1978; 2: 59-100. Citado en Farrance et al. (1987)
 52. **Kubiak RJ, Whitman KM, Johnston RM.** Changes in the quadriceps femoris muscle strength using isometric exercise versus electrical stimulation. *J Orthop Sports Phys Ther* 1987; 8: 573-541.
 53. **Kots YM, Xvilon VA.** Trenirovka mishechnoj sili metodom elektrostimulatsii: soobschenie 2, trenirovka metodom elektricheskogo razdrizenii mishechi. *Teor Pract Fis Cult* 1971; 4: 66-72, citado en Ward y Shkuratova (2002)
 54. **Adams GR, Harris RT, Woodard D, Dudley GA.** Mapping of electrical muscle stimulation using MRI. *J Appl Physiol* 1993; 74(2): 532-537.
 55. **Vanderthommen M, Depresseux JC, Dauchat L, Degueldre C, Croisier JL, Crielaard JM.** Blood flow variation in human muscle during electrically stimulated exercise bouts. *Arch Phys Med Rehabil* 2002; 83(7): 936-941.
 56. **Basas A, Fernández C, Martín JA.** Tratamiento fisioterápico de la rodilla: Cap. 5. Técnicas fisioterápicas aplicadas en el tratamiento de la patología de la rodilla. II EENM. Madrid. McGraw-Hill / Interamericana. 2003; 59-69.

57. **Romero JA, Sanford TL, Schroeder RV, Fahey TD.** The effects of electrical stimulation of normal quadriceps on strength and girth. *Med Sci Sports Exerc* 1982; 14: 194-197.
58. **Abardía F, Medina D.** Estar en forma con la electroestimulación neuromuscular: un estudio sobre las posibles aplicaciones de la electroestimulación. Palencia. Asociación Cultural Cuerpo, Educación y Motricidad. 2004; 124.
59. **Westing SH, Seger JY, Thorstensson A.** Effects of electrical stimulation on eccentric and concentric torque-velocity relationships during knee extension in man. *Acta Physiol Scand* 1990; 140(1): 17-22.
60. **Farrance BW, Houston ME, Ranney DA.** Effects of electrical stimulation training using the extended leg position on quadriceps muscle of women. *Can J Appl Sports Sci* 1987; 12: 170-174.
61. **Feiereisen P, Duchateau J, Hainaut K.** Motor unit recruitment order during voluntary and electrically induced contractions in the tibialis anterior. *Exp Brain Res* 1997; 114(1): 117-123.
62. **Alon G, Kantor G, Ho HS.** Effects of electrode size on basic excitatory responses and on selected stimulus parameters. *J Orthop Phys Ther* 1994; 20(1): 29-35.
63. **Brooks ME, Smith EM, Currier DP.** Effect of longitudinal versus transverse electrode placement on torque production by the quadriceps femoris muscle during neuromuscular electrical stimulation. *J Orthop Sports Phys Ther* 1990; 11: 530-534.
64. **Bergman BC, Martin DT, Wilkinson JG.** Knee extensor torque and perceived discomfort during symmetrical biphasic electromyostimulation. *J Strength Cond Res* 2001; 15(1): 1-5.
65. **Bax L, Staes F, Verhagen A.** Does neuromuscular electrical stimulation strengthen the quadriceps femoris? A systematic review of randomised controlled trials. *Sports Med* 2005; 35: 191-212.
66. **Turostowski J, Cometti G, Cordano M.** Influence of electrostimulation on human quadriceps femoris muscle strength and muscle mass. *Actas de la ISBS. X Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* 1992; 139-141.
67. **Herrero JA.** Efectos inducidos por el entrenamiento de fuerza con electroestimulación neuromuscular en la fuerza y potencia muscular. Tesis Doctoral. Universidad de León. 2006
68. **Paillard T, Noé F, Passelergue P, Dupui P.** Electrical stimulation superimposed onto voluntary muscular contraction. *Sports Med* 2005; 35(11): 951-966.
69. **Allen GM, Gandevia SC, McKenzie DK.** Reliability of measurements of muscle strength and voluntary activation using twitch interpolation. *Muscle Nerve* 1995; 18: 593-600.
70. **Yue GH, Ranganathan VK, Siemionow V, et al.** Evidence of inability to fully activate human limb muscle. *Muscle Nerve* 2002; 23: 376-384.
71. **Kramer JF.** Effect of electrical stimulation current frequencies on isometric knee extension torque. *Phys Ther* 1987; 67: 31-38.
72. **Poumarat G, Squire P, Lawani M.** Effect of electrical stimulation superimposed with isokinetic contractions. *J Sports Med Phys Fit* 1992; 32(3): 227-233.
73. **Strojnik V.** Muscle activation level during maximal voluntary effort. *Eur J Appl Physiol* 1995; 72(1/2): 144-149.
74. **Brasileiro JS, Castro CES, Parizotto NA, Sandoval MC.** Estudio comparativo entre la capacidad de generación de torque y la incomodidad sensorial producidos por dos formas de estimulación eléctrica neuromuscular en sujetos sanos. *Rev Iberoam Fisioter Kinesiol* 2000; 3(2): 00-00.
75. **Strojnik V.** The effects of superimposed electrical stimulation of the quadriceps muscles on performance in different motor tasks. *J Sports Med Phys Fit* 1998; 38(3): 194-200.
76. **Bobbert MF, Van Ingen-Schenau GJ.** Coordination in vertical jumping. *J Biomech* 1988; 21(3): 249-262.
77. **Amiridis IG, Martin A, Morlon B, Martin L, Cometti G, Pousson M, vanHoecke J.** Co-activation and tension-regulating phenomena during isokinetic knee extension in sedentary and highly skilled humans. *Eur J Appl Physiol* 1996; 73: 149-156.

78. **Portmann M, Montpetit R.** Effects de l'entraînement par électrostimulation isométrique et dynamique sur la force de contraction musculaire. *Sci Sports* 1991; 6(3): 193-203.
79. **Pichon F, Chatard JC, Martin A, Cometti G.** Electrical stimulation and swimming performance. *Med Sci Sport Exerc* 1995; 27(12): 1671-1676.
80. **Maffiuletti NA, Pensini M, Martin A.** Activation of human plantar flexor muscles increases after electromyostimulation training. *J Appl Physiol* 2002; 92: 1383-1392.
81. **Valli P, Boldrini L, Bianchedi D, Brizzi G, Miserocchi G.** Effect of low intensity electrical stimulation on quadriceps muscle voluntary maximal strength. *J Sports Med Phys Fitness* 2002; 42(4): 425-430.
82. **Porcari JP, Miller J, Cornwell K, Foster C, Gibson M, McLean K, Kernozek T.** The effects of neuromuscular electrical stimulation training on abdominal strength, endurance, and selected anthropometric measures. *J Sports Sci Med* 2005; 4: 66-75.
83. **Gondin J, Guette M, Ballay Y, Martin A.** Electromyostimulation training effects on neural drive and muscle architecture. *Med Sci Sports Exerc* 2005; 37(8): 1291-1299.
84. **Herrero JA, Izquierdo M, Maffiuletti NA, García J.** Electromyostimulation and Plyometric Training Effects on Jumping and Sprint Time. *Int J Sports Med* (En prensa).
85. **Brocherie F, Babault N, Cometti G, Maffiuletti N, Chatard JC.** Electrostimulation training effects on the physical performance of ice hockey players. *Med Sci Sports Exerc* 2005; 37(3): 455-460.
86. **Rodríguez LP, Gusi N.** Manual de prevención y rehabilitación de lesiones deportivas. Madrid. Síntesis, S.A. 2002: 313.
87. **Cometti G.** La Pliometría. Cap. 10: Pliometría y electroestimulación. Barcelona. Inde. 1998; 83-96.
88. **Sánchez-Alarcos JV, Pablos C.** Los métodos de electroestimulación y de contraste como sistemas complementarios del entrenamiento de la fuerza en taekwondo. *RSD* 2002; 16(2): 27-38.
89. **Wolf SL, Ariel GB, Saar D, Penny MA, Railey P.** The effect of muscle stimulation during resistive training on performance parameters. *Am J Sports Med* 1986; 14: 18-23.
90. **Requena B, Padial P, González-Badillo JJ.** Percutaneous electrical stimulation in strength training: an update. *J Strength Cond Res* 2005; 19(2): 438-448.
91. **Shield A, Zhou S.** Assessing voluntary muscle activation with the twitch interpolation technique. *Sports Med* 2004; 34(4): 253-267.
92. **Millet GY, Lepers R.** Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports Med*, 2004; 34(2): 105-116.
93. **Sale DG.** Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc*.1988; 20(5): S135-S145.
94. **Ruther CL, Catherine LG, Harris RT, Dudley GA.** Hypertrophy, resistance training, and the nature of skeletal muscle activation. *J Strength Cond Res* 1995; 9(3): 155-159.
95. **Stevenson SW, Dudley GA.** Dietary creatine supplementation and muscular adaptation to resistive overload. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: 1304-1310.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León la ayuda económica recibida para la realización de este estudio, a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación (LE016B05).

Correspondencia:

J. Azael Herrero Alonso

Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Europea Miguel de Cervantes.

Padre Julio Chevalier, 2. 47012 Valladolid. E-mail: jaherrero@uemc.edu

Aceptado: 18-07-2006 / Revisión nº 194