

Estimulación magnética del cuádriceps. Análisis de 2 estimuladores de uso diagnóstico y terapéutico

Víctor Bustamante Madariaga^{a,b}, Amaia Gorostiza Manterola^c, Elena López de Santa María Miró^c y Juan B. Gáldiz Iturri^{b,c}

^aServicio de Neumología. Hospital de Basurto. Osakidetza. Bilbao. Vizcaya. España.

^bDepartamento de Medicina. Facultad de Medicina. Universidad del País Vasco. Leioa. Vizcaya. España.

^cServicio de Neumología. Hospital de Cruces. Osakidetza. Baracaldo. Vizcaya. España.

La estimulación supramáxima o *twitch* magnético isométrico del cuádriceps es una técnica reproducible y objetiva que nos informa sobre la función muscular, que se encuentra comprometida en las enfermedades respiratorias. Hemos validado la técnica estándar y comparado un equipo utilizado en nuestro laboratorio con otro electroimán de referencia. También evaluamos el potencial de la técnica para entrenamiento muscular mediante estimulación repetitiva.

Los equipos Magstim 200 con pala en mariposa (MAG, equipo de referencia) y Medtronic Magpro con pala circular (MED) se aplicaron sobre el nervio femoral de 6 voluntarios, a diferentes porcentajes del estímulo máximo. El MED se aplicó también sobre el músculo cuádriceps (MED-Q). Se realizaron medidas voluntarias y comparaciones entre equipos y días diferentes. El MED alcanzó valores menores que el MAG, con mayor variabilidad entre días y sin clara supramaximalidad. La estimulación MED-Q fue equivalente al 80,7% del MAG.

En conclusión, no puede garantizarse un estímulo supramáximo del cuádriceps con el MED y pala redonda, aunque ésta, aplicada sobre el músculo, genera una contracción que avala este abordaje para la estimulación repetitiva.

Palabras clave: Músculos esqueléticos. Cuádriceps. Nervio femoral. EPOC. Enfermedad neuromuscular. Neurofisiología. Pruebas de función respiratoria. Electromagnetismo. Estimulación magnética.

Introducción

El interés por el estudio de la musculatura estriada en los pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva cró-

Magnetic Stimulation of the Quadriceps: Analysis of 2 Stimulators Used for Diagnostic and Therapeutic Applications

Compromised muscle function can be evaluated in respiratory disease patients by supramaximal magnetic stimulation (isometric twitch) of the quadriceps, a technique that is reproducible and objective. We validated the technique, comparing a device used in our laboratory with another reference electromagnet. We also assessed whether the technique could potentially be used to train the muscle by repetitive stimulation.

The Medtronic Magpro (MED) device with a circular coil and the Magstim 200 device (MAG) with a figure-of-eight coil (reference device) were used to stimulate the femoral nerve of 6 volunteers at different percentages of maximal output. MED stimulation was also applied on the quadriceps muscle. We measured voluntary contractions, comparing measurements from the 2 devices and on different days.

The stimulation achieved with MED was lower than with MAG, showed greater day-to-day variability, and was not clearly supramaximal. MED quadriceps stimulation was 80.7% of MAG stimulation.

In conclusion, supramaximal stimulation of the quadriceps cannot be guaranteed with MED and the circular coil. However, this device generates sufficient contraction when applied to the muscle to be used for repetitive stimulation.

Key words: Skeletal muscles. Quadriceps. Femoral nerve. Chronic obstructive pulmonary disease (COPD). Neuromuscular disease. Neurophysiology. Lung function tests. Electromagnetism. Magnetic stimulation.

Estudio financiado por becas SEPAR 2004 y EC Grant ENIGMA in COPD.

Correspondencia: Dr. V. Bustamante Madariaga.
Servicio de Neumología. Hospital de Basurto.
Avda. Montevideo, 18. 48013 Bilbao. España.
Correo electrónico: victor.bustamantemadariaga@osakidetza.net

Recibido: 25-9-2006; aceptado para su publicación: 28-11-2006.

nica (EPOC) ha evolucionado desde el simple interés por la función ventilatoria, sobre todo del diafragma, hasta un conocimiento cada vez mayor de aspectos "sistémicos" de la enfermedad. La función de los músculos periféricos se ve reflejada en índices que evalúan la gravedad de los pacientes EPOC, como el índice BODE (índice de masa corporal, obstrucción al flujo aéreo, disnea y capacidad de ejercicio)¹, con mayor relevancia pronóstica que la propia obstrucción. Esto es debido a que la función muscular está relacionada con la capacidad de esfuerzo² y es el constituyente esencial de la

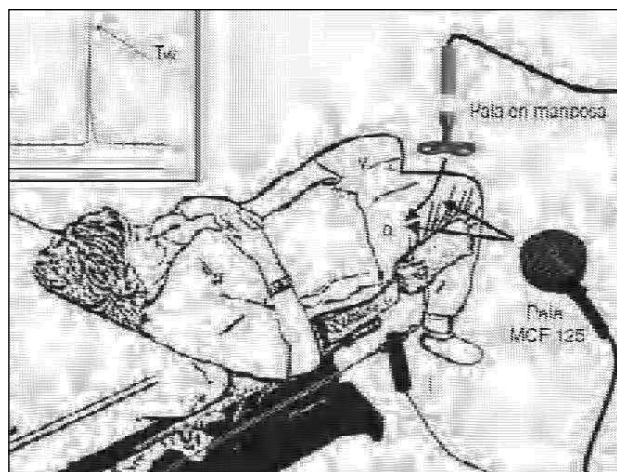


Fig. 1. Voluntario preparado para recibir un estímulo sobre el nervio femoral. Un transductor (T) conectado al tobillo recoge la fuerza generada. En el cuadro superior se muestra un registro de fuerza tras un *twitch*. El valor pico se mide como *twitch* (Tw). Las 2 palas de estimulación representadas corresponden a la pala en forma de 8 o en mariposa del equipo Magstim, que se aplica verticalmente, y a la pala redonda MCF 125 del equipo Medtronic. Ambas se aplicaron en la zona inguinal, sobre el nervio femoral (a), pero la pala redonda se aplicó también directamente sobre el cuádriceps (b) en el muslo.

masa magra, un índice nutricional que supera la representatividad del índice de masa corporal de cara al pronóstico³.

Entre los músculos esqueléticos afectados en la EPOC están los propios músculos inspiratorios, que son susceptibles de mejorar funcionalmente por el entrenamiento^{4,5}, y sobre todo los de las extremidades inferiores, en particular el cuádriceps, cuya disfunción está ampliamente documentada en la EPOC^{6,7}. En este músculo las características más frecuentemente observadas son la pérdida de fibras tipo I⁸ y una menor capacidad oxidativa^{9,10}. Estos datos se han relacionado con una peor calidad de vida¹¹, menor capacidad de ejercicio y mayor utilización de recursos sanitarios¹². Desde el punto de vista clínico es llamativo que una proporción alta de pacientes con EPOC, a pesar de presentar una mecánica respiratoria muy alterada, vea limitada su capacidad de esfuerzo por una sensación de fatiga muscular y no de disnea¹³.

Una técnica de creciente utilización para el estudio de la musculatura periférica es la medición de la fuerza producida por un músculo tras un estímulo magnético supramáximo o *twitch*¹⁴. El procedimiento que debe seguirse en la evaluación del cuádriceps ha sido descrito por Polkey et al¹⁵ y la medida se acepta como habitual en el estudio muscular de los pacientes con EPOC, ya que es representativa de un grupo muscular fundamental de las extremidades inferiores¹⁶. Las ventajas de esta técnica son que es indolora, supramáxima y, por tanto, reproducible, y que puede utilizarse como medida fiable de disfunción muscular en personas con dificultades de colaboración, pacientes pediátricos, con alteraciones del sistema nervioso central, ingresados en unidades de cuidados intensivos o simplemente en estados patológicos como la EPOC¹⁵. En estos pacientes se ha observado

una gran variabilidad en la realización de las maniobras voluntarias, muy superior a la de los sujetos sanos^{15,17}, por lo que la validez clínica de éstas podría cuestionarse, más aún si se trata de protocolos de entrenamiento que implican un aprendizaje. Dada la disponibilidad de un test no voluntario, que además permite detectar la fatiga muscular^{6,15,16}, así como la posibilidad de realizar biopsias de este músculo con relativa facilidad, es posible efectuar estudios morfofuncionales que contribuyen al creciente desarrollo del conocimiento sobre los efectos de la rehabilitación y de otras intervenciones en los aspectos sistémicos de esta enfermedad.

En nuestro trabajo nos hemos propuesto valorar el equipo Medtronic Magpro con pala circular refrigerada MCF 125 (MED), con un amplio uso potencial para el diagnóstico y la rehabilitación muscular, ya que permite realizar estimulaciones repetidas durante períodos prolongados. Quisimos determinar, por una parte, su rendimiento diagnóstico para la determinación del estímulo supramáximo o *twitch* del cuádriceps (TwQ), comparado con la técnica de referencia¹⁵, y por otra, la respuesta tras la aplicación directa de la pala de estimulación sobre el músculo. Este abordaje directo, por sencillo y bien tolerado¹⁸, debe de ser el más adecuado para la estimulación magnética repetitiva del cuádriceps, fundamento de futuros protocolos de entrenamiento. Si demostramos una amplia activación muscular con buena respuesta de contracción, podemos predecir un efecto de entrenamiento eficaz a partir de estímulos repetidos mejor que con otros abordajes terapéuticos como la estimulación eléctrica¹⁹⁻²¹. Podemos utilizar estos tratamientos en pacientes que, por su gravedad, no pueden realizar una rehabilitación respiratoria convencional²².

Métodos

Descripción de la técnica

Realizamos la técnica del TwQ tal como describen Polkey et al¹⁵ y con un equipamiento similar. Con el fin de evitar la potenciación de la respuesta muscular que tiene lugar tras una actividad reciente, durante los 20 min previos a las maniobras los sujetos descansan en una camilla específicamente habilitada, con las rodillas flexionadas a 90°. El tobillo de la pierna dominante se rodea con una cincha inextensible, conectada longitudinalmente en el eje de extensión de la pierna a un dinamómetro de tensión Biopac (dinamómetro Biopac TSD 121C). En nuestro caso la señal se amplifica con un sistema Biopac (Biopac Systems, Inc., Goleta, CA, EE.UU.), se envía a un PC y se procesa mediante el paquete informático AcqKnowledge[®] versión 3.7.3 (Biopac Systems, Inc., Microsoft Corporation). En la figura 1 se muestran la posición del paciente para las estimulaciones, las palas utilizadas y un ejemplo de señal de *twitch* recogida.

Procedimientos

Para la validación de la técnica y el estudio del equipo alternativo MED estudiamos a 6 voluntarios sanos (edad entre 27 y 50 años; 3 mujeres y 3 varones), cuyos datos antropométricos y generales se recogen en la tabla I. Todos ellos estaban vinculados a nuestro laboratorio de exploración funcional, pero no tenían experiencia en la realización de mediciones de TwQ.

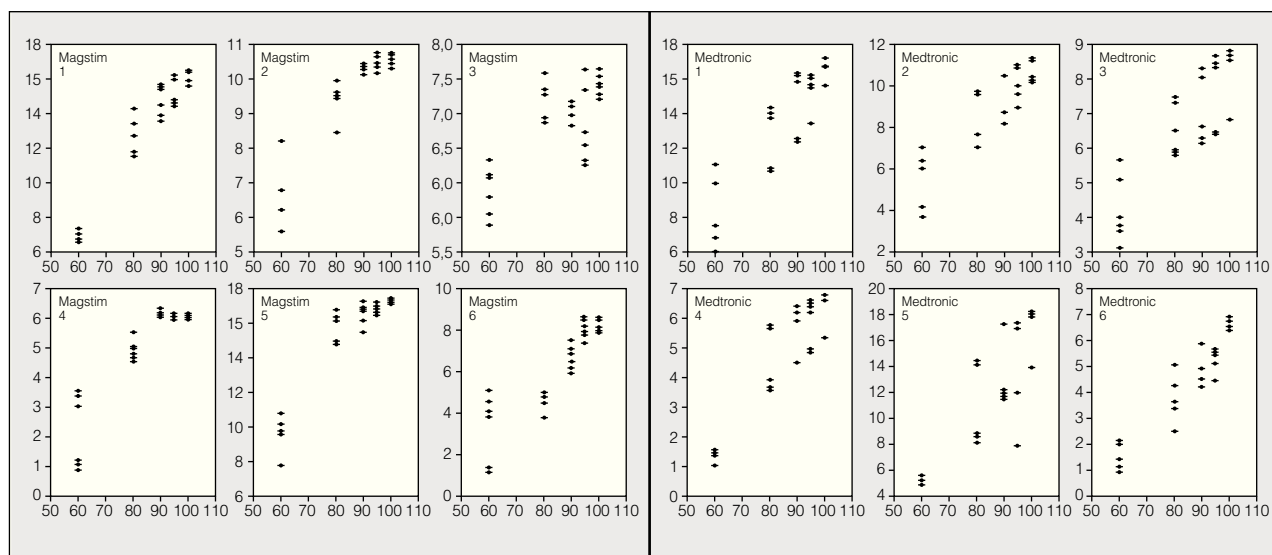


Fig. 2. Representación de los *twitches* con Magstim (izqda.) y Medtronic (dcha.) en los 6 sujetos estudiados. Con Magstim la totalidad de los casos se aproxima a un techo de respuesta, que únicamente se aprecia en Medtronic en los casos 4 y 5.

Equipos y abordajes

Se empleó el electroimán Magstim 200 Mono Pulse (MAG; Magstim Co. Ltd., Spring Gardens Whitland, Carmarthenshire, Gales, Reino Unido), conectado a una pala doble, en mariposa, de herrar, en forma de 8 y de 45 mm. El equipo comercial se había modificado a 2,5 teslas. Para las mediciones con MED se utilizó el equipo Medtronic Magpro (Medtronic Danmark A/S, Copenhagen, Dinamarca) con pala circular refrigerada MCF 125 de 60 mm de radio (fig. 1).

Abordaje femoral. Se localiza por palpación la arteria femoral en el triángulo femoral, por debajo del ligamento inguinal, e inmediatamente lateral a este punto se sitúa el campo máximo de la pala, en la unión de las 2 bobinas para MAG o en la zona periférica de la pala redonda para MED. La posición óptima se establece mediante desplazamientos mínimos desde este punto y mediante leves ajustes del eje de la pala, según la respuesta a varios *twitches* equipotentes. Posteriormente se realizan series de mediciones, con 5 *twitches* al 60, el 80, el 90, el 95 y el 100% del estímulo máximo, en orden aleatorio. Las estimulaciones se espacian al menos 20 s para evitar la potenciación¹⁴.

Abordaje crural. Para el MED en cuádriceps (MED-Q) también aplicamos la pala MED directamente sobre el músculo vasto externo del cuádriceps, preferentemente centrada en-

tre el tercio superior y los dos tercios inferiores del vientre del músculo, en el punto de mayor respuesta, para proceder a las mediciones con el protocolo antes indicado.

Supramaximalidad. Conceptualmente, para la medida de la tensión isométrica generada por el TwQ se requiere que el estímulo aplicado sea supramáximo^{14,15}, lo que se pone de manifiesto mediante registros electrofisiológicos o por la presencia de un *plateau* o meseta de respuesta en las intensidades superiores, visible en las curvas estímulo-respuesta (fig. 2 para MAG y MED).

Máxima contracción voluntaria. Utilizando el mismo esquema (fig. 1) y el dinamómetro con equipo de medida Biopac, medimos la máxima contracción voluntaria tras 5 esfuerzos máximos de contracción isométrica en la misma posición descrita (decúbito con rodillas flexionadas a 90°), siempre después de las medidas MAG, MED y MED-Q.

Repeticiones. En todos los casos, repetimos en 2 días diferentes las medidas de estimulación magnética, que realizó siempre el mismo operador, con idéntico procedimiento y descartando una actividad física muy diferente en el día o la víspera.

Análisis estadístico

Se recogieron las mediciones de las diferentes maniobras y se determinaron los valores de *twitch* máximo absoluto de cada sujeto y los valores medios en cada nivel de estimulación, para cada una de las operaciones descritas. Se calcularon las

TABLA I
Datos antropométricos de los sujetos estudiados y valores máximos de contracción voluntaria (MCV) y de *twitch*, en valor máximo ($Tw_{máx}$, con Magstim [MAG]) y como valor medio al 100% (con MAG, Medtronic [MED] y MED aplicado en cuádriceps [MED-Q])

Caso	Sexo	Edad (años)	Talla (cm)	Peso (kg)	MCV	$Tw_{máx}$	MAG	MED	MED-Q	$Tw_{máx}/MCV$
1	Varón	50	180	90	55,76	16,47	15,96	12,29	10,96	29,54%
2	Varón	40	181	81	57,60	11,44	10,97	10,85	10,1	19,86%
3	Mujer	45	161	50	30,93	7,71	7,25	7,76	6,72	24,93%
4	Mujer	27	159	54	20,47	6,11	5,94	5,91	5,23	29,85%
5	Varón	26	183	74,8	49,27	17,35	16,89	15,9	14,19	35,21%
6	Mujer	26	168	65,3	32,80	8,60	7,92	6,78	4,37	26,22%
Media	3:3	26-50	172	69,2	41,14	11,28	10,82	9,915	8,592	27,6%
DE			10,7	15,6	15,17	4,7	4,65	3,82	3,79	5,21%

DE: desviación estándar.

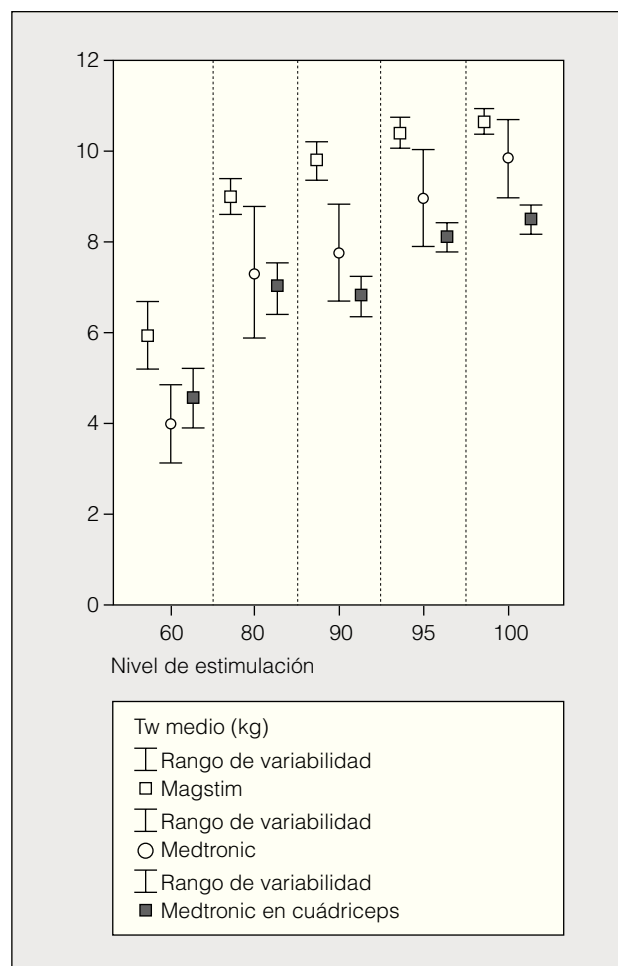


Fig. 3. Valores medios de *twitch* en los diferentes niveles de estimulación con la técnica estándar de Magstim, con Medtronic y con Medtronic aplicado al cuádriceps. Los segmentos que cruzan los símbolos representan el rango de variabilidad intradía. Obsérvese que la pala doble de Magstim aplicada en la región femoral y la redonda aplicada sobre la masa del músculo (Medtronic en cuádriceps) alcanzan una meseta, a diferencia de la aplicación inguinal de la pala redonda de Medtronic.

diferencias en *twitch* entre los diferentes abordajes y se empleó la prueba de la t de Student para datos apareados para la valoración estadística de estos parámetros. Se aceptó un valor de $p < 0,05$ como límite de la significación estadística.

El coeficiente de variabilidad (CV) de la técnica realizada en 2 días diferentes se definió como el valor medio de las diferencias en valor absoluto dividido por el promedio de los valores medidos, multiplicado por 100 (se expresa en porcentaje).

Dado que consideramos el equipo MAG como la técnica de referencia, se compararon sus resultados pareados con los de MED y MED-Q para determinar los valores de correlación.

Resultados

Mediciones

Todos los sujetos toleraron bien el procedimiento y no hubo dificultades para completar el estudio. En la tabla I figuran los datos de contracción máxima voluntaria, *twitch* y relación entre ambas, en porcentaje, junto con los datos antropométricos.

La comparación del rendimiento de los 2 equipos con distintos grados de estimulación puede observarse en la figura 3. Destacamos que los valores de *twitch* más altos se consiguieron con el equipo estándar MAG, con un valor medio para los *twitches* al 100% de 10,74 kg, frente a los 9,86 kg de MED y 8,54 kg de MED-Q.

Al repetir los tests en días diferentes se observaron diferencias mínimas entre el primer y segundo días: $-0,1849$ (error estándar: 0,22) para MAG y $-0,0253$ para MED (error estándar: 0,333); dichas diferencias no fueron significativas ($p = 0,44$ y $0,94$, respectivamente).

La dispersión de las medidas, sin embargo, fue superior con MED respecto a MAG. Con el máximo estímulo (100%) se observó un CV interdía del 17,99% para MED, frente al 5,06% para MAG o el 6,84% para MED-Q. Los coeficientes intradía fueron del 1,52, el 1,47 y el 1,94% para MED, MAG y MED-Q, respectivamente. Tal como se observa en la figura 3, esta variabilidad del MED fue todavía mayor en todos los niveles submáximos. También se observó que MED-Q proporcionaba una respuesta que equivalía a un 81% de MAG sin la variabilidad de este equipo en la zona inguinal.

Con el conjunto de los datos expuestos en la figura 3, la supramaximalidad del estímulo, es decir, la aparición de una meseta o *plateau* de respuesta con estímulos crecientes, se observó con MAG o MED-Q, pero no con MED.

En la figura 4 se representan pareados los datos obtenidos con ambos estimuladores. Al contraponer tanto los datos medios al 100% (fig. 4, panel de la izquierda) como los valores máximos obtenidos (fig. 4, panel de la derecha) se observaron unos valores de *twitch*-MED inferiores a los de MAG. La recta de regresión quedaba por debajo de la diagonal de identidad, si bien algunos puntos de la gráfica se localizaban sobre dicha diagonal. Para la estimulación con pala redonda en el muslo (MED-Q) la recta de regresión fue todavía más divergente, aunque con valores similares del coeficiente de determinación (r^2).

En los 6 voluntarios se obtuvieron las curvas estímulo-respuesta para comprobar la supramaximalidad de MAG y MED en abordaje femoral, tal como se muestra en la figura 2. Se observaron estímulos supramáximos con MAG en todos los casos. Por el contrario, sólo se consiguió observar la característica meseta de respuesta en 2 casos con el estimulador MED (fig. 2, panel de la derecha).

Indicaciones

Al tratarse de una técnica que no precisa la colaboración del paciente puede realizarse en cualquier situación clínica, siempre que no haya contraindicación. Incluso en casos de buena situación clínica o integridad neurológica se ha documentado la ejecución incorrecta de las maniobras de máxima contracción voluntaria en una alta proporción de pacientes con EPOC¹⁷. Este hecho, junto con la posibilidad de aprendizaje con la repetición de las pruebas, hace recomendable realizar maniobras no voluntarias cuando se trate de valorar la respuesta muscular tras tratamientos de rehabilitación u otras medidas con repercusión sistémica.

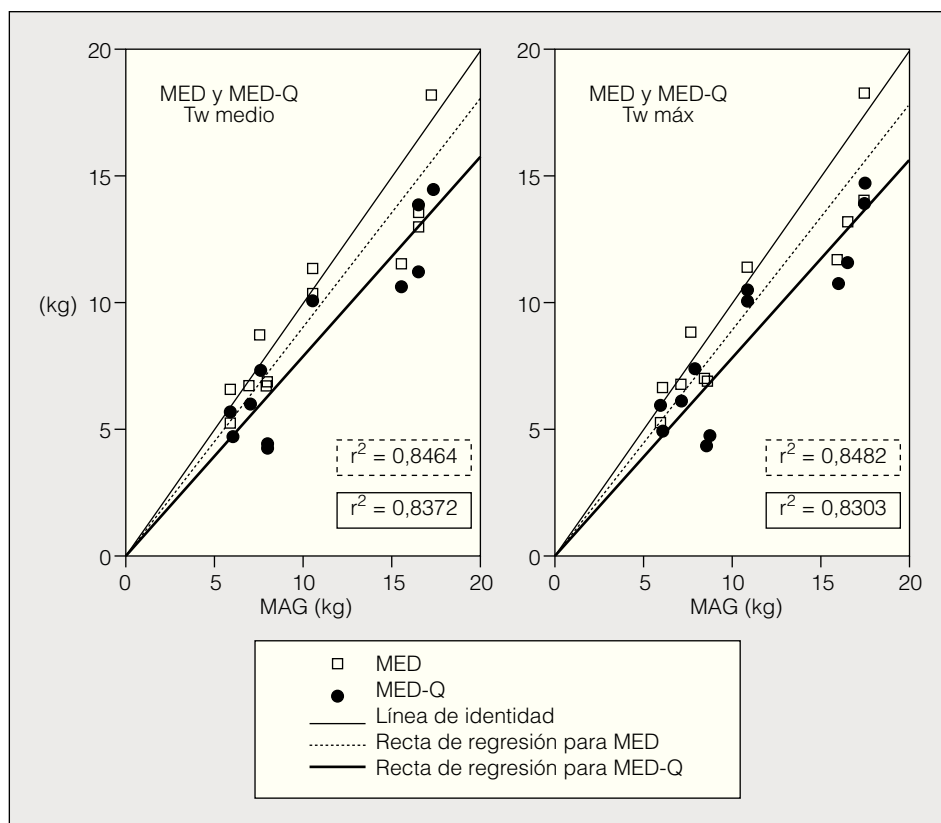


Fig. 4. Datos pareados de Magstim (MAG) respecto de Medtronic (MED) y MED aplicado en cuádriceps (MED-Q), al 100%. A la izquierda se indican los valores medios al 100% y a la derecha, los valores máximos de *twitch* ($Tw_{máx}$). La línea diagonal de identidad, que indicaría equivalencia de los tests, se compara con las rectas de regresión para MED y para MED-Q. Se señalan los coeficientes de determinación r^2 .

En neumología esta técnica tiene especial interés en el estudio de los pacientes con EPOC, tanto estable como agudizada, con el fin de valorar la repercusión sistémica muscular de la enfermedad⁷. En pacientes con una estancia prolongada en la unidad de cuidados intensivos o encamados durante largo tiempo, documentar la disfunción muscular puede ser útil para el diagnóstico y seguimiento de los trastornos neuromusculares adquiridos. Además, el estudio conjunto de los músculos inspiratorios²³ y de la musculatura periférica ayuda a pronosticar la evolución del destete y la recuperación física de los pacientes, y sirve para indicar medidas de rehabilitación en los pacientes que las requieran. El estudio de la musculatura periférica sirve como complemento al estudio no invasivo de la musculatura respiratoria, utilizando el mismo equipo diagnóstico.

Una indicación específica del TwQ es la exploración de pacientes con enfermedades neuromusculares, sobre todo de niños. Si bien el papel del neumólogo se centra en atender los problemas por compromiso muscular de la ventilación, tos o deglución, también necesita disponer de técnicas no voluntarias para el estudio de los músculos inspiratorios, lo que nos capacita igualmente para la exploración funcional de músculos periféricos como el cuádriceps.

Contraindicaciones

Desde la introducción de la estimulación magnética se ha teorizado sobre sus potenciales efectos adversos.

Sin embargo, ni tan siquiera en los casos de estimulación transcranial repetida se han documentado efectos inesperados o significativos¹⁴.

La presencia de objetos metálicos en el campo de aplicación de la estimulación y sobre todo la proximidad de un marcapasos que pudiera dañarse constituyen contraindicaciones claras para la utilización de estimuladores magnéticos¹⁴. Es práctica habitual evitar la estimulación magnética durante el embarazo, pese a que no hay evidencias de que tenga efectos sobre el feto. Otro efecto, sólo documentado en animales, es el daño acústico con las descargas repetidas, lo que puede evitarse con medidas de protección.

Discusión

Hemos presentado los datos obtenidos en la evaluación de diferentes equipos de estimuladores y palas para la estimulación magnética del cuádriceps, diseñados tanto con fines diagnósticos (TwQ) como terapéuticos, de entrenamiento. Nuestros resultados corroboran la adecuación de MAG con pala en mariposa para la obtención del TwQ. Con el equipo MED con pala circular se obtienen valores ligeramente inferiores y no siempre se consiguen criterios de estimulación supramáxima. Aplicado sobre el músculo, directamente sobre la masa del cuádriceps, consigue una respuesta significativa, equivalente al 80% del *twitch* máximo, con un perfil que indica que una porción muy significativa del músculo es estimulada de forma supramáxima.

Con la técnica descrita para MAG¹⁵, la medición del TwQ resultó ser un procedimiento reproducible y supra-máximo. En los 6 sujetos sanos del estudio el estímulo fue supramáximo según la representación gráfica de las curvas estímulo-respuesta (fig. 2, panel izquierdo), con un techo de respuesta generalmente en valores entre el 90 y el 100%. La reproducibilidad, expresada por el CV, y los valores de *twitch* obtenidos se encuentran dentro de los límites de la publicación de referencia¹⁵, con cifras para varones entre 11 y 17 kg.

Simultáneamente a la validación del *twitch* con el equipo estándar, hemos analizado el rendimiento de un equipo alternativo, MED, un estimulador magnético capaz de emitir series de impulsos de hasta 30 Hz y dotado de una pala refrigerada que evita el sobrecalentamiento en estimulaciones repetidas. La potencial utilidad de este equipo es más amplia que la de MAG, tanto para el diagnóstico neurofisiológico como por lo que se refiere a su posible aplicación en programas de rehabilitación. Su utilidad diagnóstica para la evaluación concreta del TwQ no se había evaluado con anterioridad, y posiblemente por ello, al iniciar nuestro estudio, no había comercializada ninguna pala equivalente a la de MAG, por lo que utilizamos la pala circular de 60 mm. En la comparación con MAG, este equipo no iguala su valor de *twitch*, aunque se aproxima a un 92% del *twitch* alcanzado con MAG. Esto, al igual que el hecho de que no se consigan estimulaciones supra-máximas en algunos de los sujetos (fig. 2, panel derecho), creemos que es atribuible a las características del campo magnético generado por una pala circular. Esta circunstancia ya ha sido mencionada por otros autores^{14,15}, que han encontrado las mismas dificultades para conseguir la supra-maximalidad utilizando palas redondas, también con equipos MAG. Por ello debemos señalar que una pala de doble bobina que concentre el campo magnético en el punto más accesible del nervio femoral es un requisito fundamental para asegurar un *twitch* supra-máximo. Sin embargo, aun sin este requisito, en nuestro estudio se han obtenido con MED y pala circular valores máximos de *twitch* (fig. 4, panel derecho), que no divergen en gran medida de los alcanzados con MAG. La dispersión y la mayor variabilidad de las medidas pueden deberse a las dificultades de adecuar y situar el campo de la pala circular anatómicamente, a diferencia de lo que ocurre con la pala en mariposa o en forma de 8.

Decidimos evaluar la pala circular sobre el músculo cuádriceps ya que la pala refrigerada de MED permite estímulos repetidos, lo que brinda la oportunidad de proporcionar una modalidad de tratamiento de estimulación repetitiva que tiene como precedente la estimulación eléctrica del músculo cuádriceps, que han utilizado diversos autores¹⁹⁻²¹ en pacientes con EPOC muy grave. Cuando estos pacientes han superado la ventana de oportunidad para la rehabilitación convencional²², es decir, cuando desde el punto de vista ventilatorio están incapacitados para realizar entrenamiento de músculos periféricos, técnica fundamental en cualquier programa de rehabilitación, la estimulación aislada de grupos musculares con un menor consumo de oxígeno se plantea como una opción válida¹⁸. Los resultados obtenidos

por medio de la estimulación eléctrica han demostrado mejoras significativas en la propia fuerza de la musculatura de las extremidades inferiores^{19,20}, distancia recorrida en 6 min^{20,21}, tolerancia al ejercicio máximo y de resistencia¹⁹, y disnea¹⁹. Las mejoras en la función muscular y en la capacidad de esfuerzo se relacionaron bien con la reducción de la percepción de esfuerzo en las piernas corregida para la intensidad del esfuerzo¹⁹.

En la estimulación eléctrica ésta se realiza mediante electrodos de superficie sobre el músculo, con una respuesta que se ha descrito como variable al activarse una porción mayor o menor del músculo, siempre en función de la magnitud del estímulo eléctrico, cuya limitación principal es el dolor producido²⁴. Han et al¹⁸ han comprobado un umbral de tolerancia para estímulos eléctricos que sólo permite alcanzar alrededor de un 40% de la contracción máxima en el sujeto con integridad sensorial. Frente a esto, la estimulación magnética ofrece la ventaja de ser indolora y de presentar un mejor rango de tolerancia, con lo que permite contracciones más intensas para pautas de entrenamiento más eficaces, con resultados prometedores²³.

En nuestro estudio hemos querido comprobar cuál es el resultado de la aplicación de una estimulación magnética directa sobre la masa del músculo. Al activar las ramas del nervio femoral en el interior del músculo no se trataría de un *twitch* de nervio, con activación total de las unidades motrices, pero sí de la estimulación de una amplia porción de éstas en sus ramas intramusculares, con la ventaja de que la zona superior y anteroexterna del muslo no plantean complejidades anatómicas de localización, a diferencia del triángulo inguinal, y de que su inervación sensitiva es menor, lo que implica menor incomodidad para el paciente. Pese a no englobar todo el músculo, conseguimos contracciones isométricas equivalentes a un 80% del *twitch* máximo (fig. 4), un nivel que justificaría el pretendido entrenamiento mediante estimulación magnética²³ con fines de rehabilitación. El nivel conseguido y el hecho de que esta estimulación se aproxime a una meseta parecen indicar que se estimula prácticamente la totalidad del músculo que abarca el campo magnético. Estos datos están de acuerdo con lo observado por otros autores como Kremenec et al²⁴, quienes obtuvieron un porcentaje de fuerza similar (72%) con estimulaciones repetidas de alta frecuencia. Estos autores sitúan en el 60% de la máxima contracción voluntaria el umbral de fuerza para que el entrenamiento produzca hipertrofia del músculo estimulado.

En conclusión, este estudio confirma la utilización de la estimulación magnética en la evaluación de la fuerza del cuádriceps en una maniobra no volitiva, lo que reduce los factores de variación. Asimismo corrobora la necesidad de utilizar palas que se adapten a la localización anatómica donde van a utilizarse (pala en mariposa en la región inguinal). Por último, demuestra que la estimulación magnética con aplicación directa en el músculo es capaz de alcanzar contracciones suficientes para su empleo en protocolos de entrenamiento. Esto justifica las perspectivas de esta modalidad de estimulación en la estrategia de rehabilitación para la EPOC.

BIBLIOGRAFÍA

1. Celli BR, Cote CG, MD, Marín JM, Casanova C, Montes de Oca M, Méndez RA, et al. The body-mass index, airflow obstruction, dyspnea, and exercise capacity index in chronic obstructive pulmonary disease. *N Engl J Med.* 2004;350:1005-12.
2. Gosselink R, Troosters T, Decramer M. Peripheral muscle weakness contributes to exercise limitation in COPD. *Am J Respir Crit Care Med.* 1996;153:976-80.
3. Schols AMWJ, Slangen J, Volovics L, Wouters EFM. Weight loss is a reversible factor in the prognosis of chronic obstructive pulmonary disease. *Am J Respir Crit Care Med.* 1998;157:1791-7.
4. Mota-Casals S. ¿Cuál es el papel del entrenamiento de los músculos inspiratorios en el tratamiento de la EPOC? *Arch Bronconeumol.* 2005;41:593-5.
5. Serón P, Riedemann P, Muñoz S, Doussoulin A, Villarroel P, Cea X. Efecto del entrenamiento muscular inspiratorio sobre la fuerza muscular y la calidad de vida en pacientes con limitación crónica del flujo aéreo. Ensayo clínico aleatorizado. *Arch Bronconeumol.* 2005;41:601-6.
6. Man WD, Soliman MG, Gearing J, Radford SG, Rafferty GF, Gray BJ, et al. Symptoms and quadriceps fatigue following walking and cycling in COPD. *Am J Respir Crit Care Med.* 2003;168:562-7.
7. Skeletal muscle dysfunction in chronic obstructive pulmonary disease. A statement of the American Thoracic Society and European Respiratory Society. *Am J Respir Crit Care Med.* 1999;159 Suppl 4: 1-40.
8. Whittom F, Jobin J, Simard PM, Leblanc P, Simard C, Bernard S, et al. Histochemical and morphological characteristics of the vastus lateralis muscle in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Med Sci Sports Exerc.* 1998;30:1467-74.
9. Maltais F, Simard AA, Simard C, Jobin J, Desgagnés P, LeBlanc P. Oxidative capacity of the skeletal muscle and lactic acid kinetics during exercise in normal subjects and in patients with COPD. *Am J Respir Crit Care Med.* 1996;153:288-93.
10. Montes de Oca M, Torres SH, González Y, Romero E, Hernández N, Tálamo C. Cambios en la tolerancia al ejercicio, calidad de vida relacionada con la salud y características de los músculos periféricos después de 6 semanas de entrenamiento en pacientes con EPOC. *Arch Bronconeumol.* 2005;41:413-8.
11. Simpson K, Killian K, McCartney N, Stubbing DG, Jones NL. Randomised controlled trial of weightlifting exercise in patients with chronic airflow limitation. *Thorax.* 1992;47:70-5.
12. Decramer M, Gosselink R, Troosters T, Verschueren M, Evers G. Muscle weakness is related to utilization of health care resources in COPD patients. *Eur Respir J.* 1997;10:417-23.
13. Killian KJ, Leblanc P, Martin DH, Summers E, Jones NL, Campbell EJ. Exercise capacity and ventilatory, circulatory, and symptom limitation in patients with chronic airflow limitation. *Am Rev Respir Dis.* 1992;146:935-40.
14. Man WDC, Moxham J, Polkey MI. Magnetic stimulation for the measurement of respiratory and skeletal muscle function. *Eur Respir J.* 2004;24:846-60.
15. Polkey MI, Kyroussis D, Hamnegard CH, Mills GH, Green M, Moxham J. Quadriceps strength and fatigue assessed by magnetic stimulation of the femoral nerve in man. *Muscle Nerve.* 1996;19: 549-55.
16. Mador MJ, Kufel TJ, Pineda L. Quadriceps fatigue after cycle exercise in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Am J Respir Crit Care Med.* 2000;161:447-53.
17. Allen GM, Gandevia SC, McKenzie DK. Reliability of measurements of muscle strength and voluntary activation using twitch interpolation. *Muscle Nerve.* 1995;18:593-600.
18. Han TR, Shin HI, Kim IS. Magnetic stimulation of the quadriceps femoris muscle. *Am J Phys Med Rehabil.* 2006;85:593-9.
19. Neder JA, Sword D, Ward SA, Mackay E, Cochrane LM, Clark CJ. Home based neuromuscular electrical stimulation as a new rehabilitative strategy for severely disabled patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD). *Thorax.* 2002;57:333-7.
20. Bourjeily-Habr G, Rochester CL, Palermo F, Snyder P, Mohsenin V. Randomised controlled trial of transcutaneous electrical muscle stimulation of the lower extremities in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Thorax.* 2002;57:1045-9.
21. Vivodtzev I, Pepin JL, Vottero G, Mayer V, Porsin B, Levy P, et al. Improvement in quadriceps strength and dyspnea in daily tasks after 1 month of electrical stimulation in severely deconditioned and malnourished COPD. *Chest.* 2006;129:1540-8.
22. Nici L, Donner C, Wouters E, Zuwallack R, Ambrosino N, Bourbeau J, et al. American Thoracic Society/European Respiratory Society statement on pulmonary rehabilitation. *Am J Respir Crit Care Med.* 2006;173:1390-13.
23. Gáldiz JB, Bustamante V, Camino J, Cabriada V. Comparación de la presión en boca, *twitch*, tras estimulación magnética anterior frente a estimulación magnética posterior en sujetos sanos. *Arch Bronconeumol.* 2000;36:557-62.
24. Kremenec IJ, Ben-Avi SS, Leonhardt D, McHugh MP. Transcutaneous magnetic stimulation of the quadriceps via the femoral nerve. *Muscle Nerve.* 2004;30:379-81.