

Las tareas de contracción muscular isométricas o de movimientos repetitivos para evaluar los efectos de la fatiga. Una revisión sistemática

Diego Peinado Palomino¹, Marta Torres Pareja¹, Laura Mordillo Mateos², Nuria Mendoza Láiz¹

¹Universidad de Castilla-La Mancha. Toledo. ²Grupo de investigación FENNSI del Hospital Nacional de Parapléjicos. Toledo.

Recibido: 19.02.2018
Aceptado: 30.05.2018

Resumen

La fatiga es definida como un fenómeno relacionado con el tiempo de disminución de la capacidad máxima de generación de fuerza, expresándose, como un deterioro en la contracción máxima voluntaria (CMV). La aparición de la fatiga en el músculo esquelético durante un esfuerzo ha sido de interés para los fisiólogos, especialmente porque la fatiga es un factor limitante, tanto en el rendimiento deportivo como en la realización de cualquier tarea. El objetivo del artículo es analizar la literatura y proporcionar una revisión sistemática sobre la fatiga inducida por tareas de contracción muscular, provocadas por contracciones isométricas o mediante tapping de dedos. Para ello se realizó una investigación basada en la metodología PRISMA (Artículos de informes preferidos para revisiones sistemáticas y metanálisis). Llevando a cabo una búsqueda de artículos en las bases de datos PubMed, Medline, Science Direct y Google Scholar, entre los meses de junio y noviembre de 2017 con fecha posterior al año 2000. De los 315 estudios identificados inicialmente, sólo 12 cumplieron con los criterios de selección establecidos. La variabilidad metodológica de los distintos estudios permite observar como a través de las tareas de tapping (movimientos repetitivos de dedos), o mediante tareas de contracción isométrica se pueden determinar los distintos parámetros de la fatiga que se evalúan en cada estudio, siendo un instrumento muy utilizado para abordar dicho tema. La fatiga muscular se ha estudiado predominantemente cuando es inducida por tareas isométricas, habiendo un mayor número de investigaciones que utilizan este tipo de metodología, ya que, aunque el tapping de dedos sea un procedimiento fiable para evaluar los mecanismos neurofisiológicos subyacentes de la fatiga, apenas se ha explorado.

Palabras clave:

Contracción isométrica. Tapping de dedos. Fatiga. Fuerza contráctil.

The isometric muscle contraction tasks or repetitive movements to evaluate the effects of fatigue. A systematic review

Summary

Fatigue has been defined as a phenomenon related to the time of decrease of the maximum capacity of generation of force, expressing itself, generally, as a deterioration in the maximum voluntary contraction (CMV). The appearance of fatigue in skeletal muscle during an effort has long been of interest to physiologists, especially because fatigue is a limiting factor in athletic performance or in the performance of any task. The aim of the article is to analyze the literature and provide a systematic review on fatigue induced by muscle contraction tasks, caused by isometric contractions or by finger tapping. To this end, an investigation was carried out based on the PRISMA methodology (Articles of preferred reports for systematic reviews and meta-analyses). Conducting a search of articles in the PubMed, Medline, Science Direct and Google Scholar databases, between the months of June and November of 2017 after the year 2000. Of the 315 studies initially identified, only 12 complied with the established selection criteria. The methodological variability of the different studies allows to observe how through the tapping tasks (repetitive movements of fingers), or through isometric contraction tasks, it is possible to determine the different parameters of fatigue that are evaluated in each study, being a very used to address that topic. Muscle fatigue has been predominantly studied when induced by isometric tasks, with a greater number of investigations using this type of methodology, since, although finger tapping is a reliable procedure to evaluate the underlying neurophysiological mechanisms of fatigue, it has been explored.

Key words:

Isometric contraction. Finger tapping. Fatigue. Contractile force.

Correspondencia: Diego Peinado Palomino
E-mail: diego_peinado2@hotmail.com

Introducción

La aparición de la fatiga del músculo esquelético durante un esfuerzo ha sido durante mucho tiempo de interés para los fisiólogos, especialmente porque la fatiga es un factor limitante en el rendimiento deportivo o en la realización de cualquier tarea¹. La fatiga ha sido definida como un fenómeno relacionado con el tiempo de disminución de la capacidad máxima de generación de fuerza², expresándose, por lo general, como un deterioro en la contracción máxima voluntaria (CMV). De acuerdo con la relación de fatigabilidad de la fuerza³, cuanto más fuerza ejerce un músculo, más rápidamente se fatiga y llega al punto de falla (incapacidad para mantener la fuerza requerida).

La contracción voluntaria de un músculo para producir fuerza o movimiento, según Taylor *et al.*⁴, implica una serie de eventos que comienzan en el cerebro y terminan en el músculo. Los procesos que conducen a la fatiga muscular comienzan cuando las personas hacen contracciones repetitivas o sostenidas del músculo, por lo tanto, la fatiga muscular puede definirse como cualquier pérdida inducida por el ejercicio de la capacidad de producir fuerza con un músculo o grupo muscular⁵. Siendo esta transitoria y reversible con reposo, excepto en patologías donde permanezca de forma crónica. Como síntoma crónico, la fatiga es una manifestación bien conocida de una serie de trastornos somáticos, entre los que se incluyen el cáncer, la esclerosis múltiple (EM), la enfermedad de Parkinson (EP) o los trastornos cerebrovasculares entre otros.

El término fatiga se emplea para describir tanto el estado de un grupo concreto y localizado de músculos, como para referirse a una situación donde el cansancio es generalizado y afecta a la totalidad del organismo. La fatiga a menudo no está localizada en un grupo muscular o en un proceso fisiológico individual dentro del músculo, más bien, implica varios procesos que actúan en paralelo incluyendo el músculo y las estructuras que continúan por todo el eje neural⁵. Debido a su carácter multifactorial, aún los mecanismos de su formación permanecen imprecisos. Se considera la existencia de factores que afectan a nivel muscular, generando la fatiga neuromuscular o periférica, y factores que afectan por encima de la placa motora, generando la fatiga central⁶.

La fatiga muscular se ha estudiado principalmente cuando es inducida por tareas isométricas (iso), pero los mecanismos neurofisiológicos subyacentes de la fatiga durante movimientos repetitivos rápidos de *tapping* de dedos (*finger tapping*, ft) apenas se han explorado, siendo la prueba de *tapping* un procedimiento fiable usado en todo el mundo para evaluar mecanismos fisiológicos y patológicos de movimientos repetitivos⁷.

Se ha demostrado como con la contracción voluntaria, el potencial evocado motor (PEM) aumentaba de tamaño en comparación con los potenciales evocados motores obtenidos a partir de los músculos relajados, y esto reflejaba una mayor excitabilidad a nivel cortical y espinal^{8,9}. El ejercicio fatigante puede disminuir la excitabilidad cortical, como ya demostraron Brasil-Neto *et al.*¹⁰ donde inmediatamente después del ejercicio subjetivamente fatigante la amplitud del PEM aumentaba de tamaño mientras que el período de silencio aumentaba en duración con la fatiga muscular.

Es bien aceptado que no hay una sola causa de fatiga; los mecanismos fisiológicos detrás de la disminución de la producción de fuerza

que prohíben el desempeño indefinido de las tareas son específicos de las demandas de la tarea (es decir, la intensidad de la contracción, la duración, el modo, el grupo muscular, el ángulo de la articulación, la postura de la extremidad y la estabilización). En general, se ha demostrado que el fracaso del sistema nervioso para mantener una activación suficiente del músculo es un contribuyente importante en el fallo de la tarea en las contracciones submaximales sostenidas en comparación con las contracciones máximas¹¹.

Hasta donde se conoce, son muy pocos los estudios que revisan distintos métodos para provocar fatiga y lo que ello conlleva, por tanto, el propósito de este estudio es analizar la literatura y proporcionar una revisión sistemática sobre la fatiga inducida por tareas de contracción muscular, provocadas por contracciones isométricas o mediante *tapping* de dedos.

Metodología

Se realizó una investigación teórica, donde se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura disponible sobre estudios de intervención realizados mediante contracciones isométricas o *tapping* de dedos, de acuerdo con la metodología de artículos de informes preferidos para revisiones sistemáticas y metanálisis, PRISMA (Figura 1).

Los artículos de la presente revisión se obtuvieron mediante la búsqueda en las bases de datos electrónicas PubMed, Medline, Science Direct y Google Scholar. Los términos descriptores o palabras clave de búsqueda fueron los siguientes: *muscle fatigue*, *finger tapping*, *muscle contraction* y *repetitive movements*. Para la utilización correcta de la terminología se consultaron los términos descriptores del Medical Subject Headings, efectuándose la revisión de artículos de revistas revisadas por pares, entre los meses de junio y noviembre de 2017, en los idiomas inglés, castellano y portugués con fecha posterior al año 2000.

El método utilizado para la búsqueda de la bibliografía fue el siguiente:

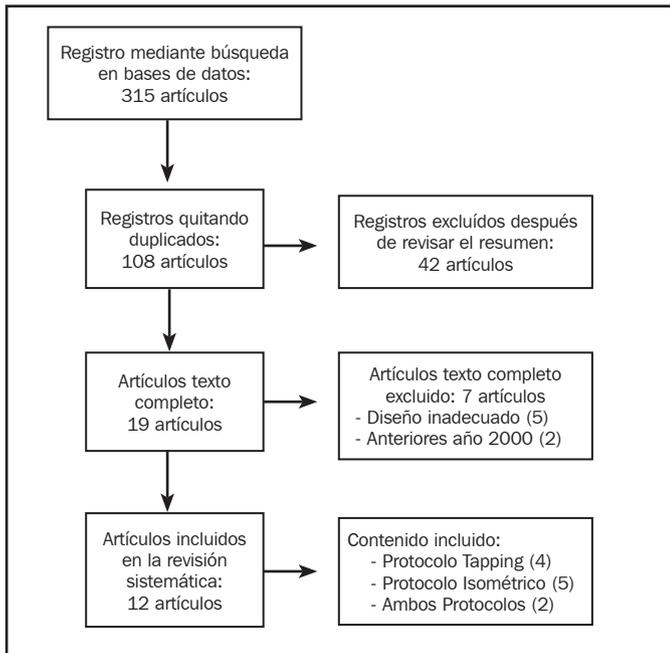
- Estudios que analizaran la fatiga mediante contracciones isométricas o isotónicas, lo que permitió extraer la información más relevante de cada investigación.
- Síntesis de la información, que hizo posible la ordenación y la combinación de la información obtenida, así como una evaluación comparativa entre los estudios que realizaban contracciones mediante *Tapping* o mediante contracción máxima voluntaria (CMV).
- Una vez finalizada la búsqueda, se estableció la selección de los artículos que se incluyeron en la revisión. Para ello fue preciso considerar la utilidad y la relevancia del tema estudiado, además de analizar la aplicabilidad de los resultados al tema de estudio.

Los artículos eran incluidos si los protocolos se basaban en tareas donde se llevaban a cabo contracciones isométricas o mediante *tapping* de dedos utilizadas para provocar fatiga, escritos en inglés, español o portugués.

Los estudios fueron excluidos si se consideraba que la metodología o diseño no cumplía con los protocolos anteriormente citados, si eran resúmenes de conferencias comunicaciones o noticias, o eran posteriores al año 2000, para basarse en investigaciones actualizadas.

El proceso de búsqueda inicial identificó 315 artículos, de los cuales se eliminaron 207 artículos duplicados. Los 108 artículos restantes se

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología PRISMA que muestra la identificación, selección y elección de estudios relevantes en esta revisión sistemática.



seleccionaron para determinar su relevancia en función de su título y resumen, lo que dio como resultado la eliminación de otros 66 estudios, quedando un total de 42 estudios, examinando el texto completo de 19 de ellos, siendo finalmente 12 los que cumplieron con los criterios de selección establecidos, después de la lectura crítica de todo el documento (Figura 1).

La validez de los artículos seleccionados estuvo dada por el grado de evidencias demostrado, por las recomendaciones del artículo y por la aplicabilidad a nuestro contexto.

Resultados

A continuación, se explica la variabilidad metodológica de los distintos estudios, los cuales comentan como a través de la fatiga provocada por tareas de *tapping* (movimientos repetitivos de dedos), o mediante tareas de contracción isométrica se pueden determinar los distintos parámetros de la fatiga que se evalúan en cada estudio.

Para ello se comienza por entender los estudios basados en la utilización de tareas de contracción (Tabla 1), donde Klass *et al.*⁹ compararon los insumos seleccionados con los grupos de neuronas motoras de los músculos flexores del codo durante el desempeño de las tareas de fuerza y posición. Realizando una tarea de fuerza que consistía en hacer una contracción fatigante al 20% de la CMV durante el mayor tiempo posible, concluyendo cuando no se podía mantener el nivel de par requerido durante 5-10 s. La tarea de posición consistía en mantener la articulación del codo en ángulo recto mientras soportaba una carga inercial equivalente al 20% de la CMV, manteniéndose durante el mayor tiempo posible, y finalizando cuando el ángulo del codo disminuyó en

10° desde el objetivo, durante 5-10 s. Ambas tareas requerían de una contracción isométrica sostenida con los músculos flexores del codo.

Williams *et al.*¹¹ compararon los ajustes supraespinales, facilitadores e inhibidores y la conducción voluntaria de la corteza motora mediante tareas de ajuste de fuerza y coincidencia de posición. Los sujetos debían realizar dos tareas fatigantes. Una consistía en mantener la fuerza equivalente al 15% de la CMV, durante el mayor tiempo posible, tirando contra un transductor de fuerza atado a la silla cuya longitud impedía que el codo flexionara más que 90°. La segunda prueba consistía en mantener, hasta el fallo, la posición de la articulación del codo a 90° sujetando un peso libre equivalente al 15% de fuerza CMV.

Butler *et al.*¹⁴ realizaron un esfuerzo voluntario máximo sostenido (CMV) de los flexores del codo derecho durante 120 s para determinar si las motoneuronas se inhiben durante una contracción isométrica máxima. El codo se flexionó a 90° atado a un miograma isométrico. Antes de la contracción de la prueba, se realizó una serie de CMV breves (de 2-3 s) a intervalos de 1 min. Después de la contracción de la prueba, se realizaron unas CMV breves.

Para comparar el comportamiento de los reflejos de latencia corta (reflejo H) y latencia prolongada (LLR), Duchateau *et al.*¹⁵ realizaron 3 sesiones. Una contracción fatigante a 25% CMV mantenida hasta el límite de resistencia. La segunda sesión, una contracción intermitente (contracción de 6 s, descanso de 4 s a 25% de CMV durante la misma duración que la contracción sostenida a 25% de CMV. En la tercera sesión una contracción sostenida al 50% CMV hasta el límite de resistencia. Las contracciones sostenidas (25 y 50% CMV) finalizaron cuando el sujeto no pudo mantener el nivel de fuerza requerido durante 5 s.

Mediante cinco flexiones isométricas voluntarias máximas de codo (1, 2 s) separadas por descansos de 1 min, Taylor, *et al.*¹⁶ examinaron el desarrollo del componente supraespinal de la fatiga central. Los patrones utilizados fueron 5 s al 50% de CMV y 5 s de descanso. 12 contracciones de 15 s al 60% de CMV y descanso de 10 s. 12 contracciones de 15 s al 75% de CMV y 5 s de reposo. Y 6 contracciones de 30 s al 86% de CMV y descanso de 5 s. Finalmente, los sujetos realizaron una serie de CMV breves a los 15 s, 30 s, y 1, 2 y 3 min después de la serie de contracciones fatigantes. Durante cada breve contracción, se administró un único estímulo magnético transcraneal.

Por último, Maluf y Enoka¹⁷ compararon los ajustes fisiológicos que ocurren cuando se realizan dos contracciones fatigantes similares al fallo. Para ello llevaron a cabo 2 tareas diferentes. En la tarea de fuerza, la extremidad se unió a una sujeción y el sujeto debía sostener una fuerza constante (15-20% del máximo) durante el mayor tiempo posible. En la otra tarea, de posición, el sujeto soportaba una carga inercial equivalente a la fuerza ejercida durante la tarea de fuerza y debía mantener un ángulo constante durante el mayor tiempo posible. El criterio para la falla de la tarea fue no sostener la fuerza o posición objetivo durante al menos 5 s.

Basándose en la utilización de tareas de *tapping* (Tabla 2), Arias *et al.*⁷ evaluaron la fatiga cortico-espinal entre tres grupos; un grupo de personas con Parkinson, grupo de personas mayores y grupo de jóvenes. Los sujetos estaban sentados cómodamente con los antebrazos puestos sobre una mesa, con los codos flexionados unos 90°, se les pidió que realizaran tareas de *tapping* con el dedo índice flexionando-extendiendo la articulación metacarpo-falangiana, donde se incluyeron dos modos; a través de tareas de *Tapping* (FT) en su velocidad más rápida (FAST), y *tapping* en su velocidad cómoda (COMFORT). El protocolo completo

Tabla 1. Artículos relacionados con la utilización de tareas de contracción isométrica.

Autor	Muestra	Objetivo	Resultados
Klass <i>et al.</i> 2008	11 sujetos (6 hombres y 5 mujeres), con edades entre 22 y 41 años (29.4 ± 6.0 años)	Comparar los insumos seleccionados con los grupos de neuronas motoras de los músculos flexores del codo durante el desempeño de las tareas de fuerza y posición. Las comparaciones involucraron PEM en respuesta a la TMS y el reflejo de Hoffmann provocado por la estimulación eléctrica del plexo braquial en el punto de Erb.	Revelaron como el par promedio de CMV antes de la contracción de fatiga fue similar para la sesión de fuerza y la sesión de tarea de posición. La aEMG para el bíceps braquial durante la CMV del flexor del codo disminuyó inmediatamente después de la contracción fatigante en la tarea de fuerza y de posición.
Williams, Hoffman, y Clark. 2014	10 individuos sanos y diestros (5 hombres, 5 mujeres), media de edad 24 años. Los sujetos se identificaron en altamente activo (n=2, 1 hombre y 1 mujer) moderadamente activo (n=5, 3 hombres, 2 mujeres), o baja actividad (n=3, 1 hombre, 2 mujeres).	Comparar los ajustes supraespinales, facilitadores e inhibidores y la conducción voluntaria de la corteza motora, medidos con TMS, en relación con las tareas de ajuste de fuerza y coincidencia de posición.	Comprobaron como la cantidad de excitabilidad corticoespinal (PEM y PEM inducido PS) aumentó a lo largo del rendimiento de la tarea de fatiga mientras que la CMEP provocada en el SP disminuyó. Además, la cantidad de inhibición intracortical dentro de la corteza motora disminuyó o se mantuvo durante el rendimiento de la tarea de fatiga.
Butler, Taylor y Gandevia. 2003	2 grupos: Experimental, con 8 sujetos (5 hombres y 3 mujeres) que fueron estudiados en dos ocasiones. Y Control, con 8 sujetos (4 hombres y 4 mujeres). 3 de los sujetos realizaron los experimentos principales y de control. Los sujetos eran sanos y tenían una edad de 30 a 58 años.	Determinar si las motoneuronas se inhiben durante una contracción fatigante sostenida de los músculos flexores del codo y si esta inhibición es causada por la descarga de aferentes musculares del grupo III y IV.	Se mostraron cambios, durante la CMV sostenida, en el tamaño de las respuestas en el bíceps braquial producido tanto por la estimulación corticoespinal como por la estimulación del plexo braquial, revelando una disminución en el tamaño de la respuesta muscular a la estimulación del tracto corticoespinal durante la fatiga. Disminuyendo la excitabilidad de las motoneuronas, contribuyendo a la disminución de la tasa de descarga de unidades motrices y al desarrollo de fatiga central que se produce con CMV sostenidas.
Duchateau <i>et al.</i> 2002	13 voluntarios sanos, 3 mujeres y 10 hombres, de 21 a 46 años.	Comparar el comportamiento de los reflejos de latencia corta (reflejo H) y LLR en el músculo APB durante las contracciones sostenidas al 25% y 50% CMV y durante las contracciones sostenidas e intermitentes al 25% CMV.	Ambos mostraron una reducción en la amplitud absoluta, no habiendo cambios significativos en el reflejo H o la amplitud LLR. La fuerza CMV disminuyó al final de la prueba sostenida 25% CMV y 50% CMV. El promedio de EMG asociado con el CMV se redujo después de las contracciones sostenidas al 25% y 50% CMV, pero no para las contracciones intermitente.
Taylor <i>et al.</i> 2000	9 voluntarios sanos, 5 hombres y 4 mujeres, de 25 a 46 años.	Examinar si el desarrollo del componente supraespinal de la fatiga central fue similar durante los protocolos de ejercicio con diferentes niveles de actividad.	Mostraron como el periodo de silencio se alargó, y el MEP aumentó de tamaño. Al final del protocolo de fatiga después de un total de 3 minutos de contracción, la prolongación del periodo de silencio varió entre 20ms con el 50% de ciclo de trabajo y 0,75 ms con el protocolo de 30 s CMV y reposo 5s.
Maluf y Enoka. 2005	16 sujetos, 8 hombres y 8 mujeres, con edad 27 ± 4 años.	Comparar los ajustes fisiológicos que ocurren cuando se realizan dos contracciones fatigantes similares al fallo, para identificar los mecanismos que limitan la duración de la tarea más difícil.	Se observó como el tiempo para el fracaso de la tarea fue consistentemente menor para la tarea de posición (702 ± 582 s) en comparación con la tarea de fuerza (1.402-768s). Sin embargo, la cantidad de fatiga experimentada por los sujetos durante las dos tareas fue similar, como lo indican las calificaciones comparables del esfuerzo percibido al fracaso y las reducciones del 28-35% en la fuerza CMV, inmediatamente, después de cada contracción fatigante.

consistió en 3 series de 50 ciclos en COMFORT y 3 series de 50 ciclos en FAST. Se repitió dos veces con una semana de diferencia. Se registraron por medio de un sistema electrónico que incluía una placa metálica y un anillo metálico adaptado al dedo.

Anwar *et al.*¹² utilizaron tareas de *tapping* que incluían tareas simples de tocar con los dedos (FT), secuencia de dedos simple (SFS) y secuencia de dedos complejos (CFS), para comprobar la conectividad de la

red sensitivo-motora. Llevando a cabo un diseño de bloques donde los sujetos realizaban las tareas de movimiento de dedos durante 30s, seguidos por 30 s de descanso. Realizando diez bloques completos para cada tarea de movimiento de dedo, 10 minutos por tarea. Con 2 minutos de descanso entre cada tarea de movimiento.

La investigación de Lutz *et al.*¹⁸ consistía en evaluar la mano usada (dominante vs no dominante) para determinar la cantidad del patrón de

Tabla 2. Artículos relacionados con la utilización de tareas de *Tapping*.

Autor	Muestra	Objetivo	Resultados
Arias et al. 2012	3 grupos diferentes (17 personas con Parkinson promedio 69,47 años, 20 controles ancianos sanos promedio 70,55 años, y 21 controles jóvenes sanos promedio de 23,90 años)	Evaluar la validez de la prueba de punteo digital, FT, para detectar alteraciones en la formación del ritmo.	Se mostraba como el grupo de jóvenes tocaba significativamente más rápido que el grupo de Parkinson y mayores. Mientras que no apareció ningún signo de fatiga en los grupos de Parkinson y mayores, el grupo de jóvenes mostró una caída obvia de la frecuencia de <i>tapping</i> .
Anwar et al. 2016	9 sujetos sanos, 5 mujeres y 4 hombres con una edad media de 27 años (rango 21-38 años)	Aplicar el análisis de causalidad de Granger en las señales de EEG, fMRI y fNIRS, para determinar la conectividad efectiva de la red cortico-cortical sensorimotora contralateral durante las tareas de movimiento de dedos simples y complejas de la mano.	Las tareas de <i>tapping</i> se asociaron con un aumento de la actividad en la SMC, PMC y DLPFC.
Lutz et al. 2004	9 sujetos sanos (3 mujeres, 6 hombres) 4 diestros y 5 zurdos, de 22 a 34 años.	Evaluar en qué medida la mano usada (dominante vs subdominante) determina la cantidad del patrón de activación en la corteza motora primaria contralateral, medido a través de resonancia magnética, durante el ft a ritmo propio y a máxima velocidad.	Hubo un mayor incremento de las activaciones corticales de la corteza motora derecha, cuando lo diestros golpeaban con la izquierda en comparación con la mano opuesta. Diferenciando la frecuencia máxima de <i>tapping</i> entre manos, con intervalos inter- <i>tapping</i> más cortos para la mano dominante (130 a 180 ms) que para la no dominante (160 y 200 ms)
Teo et al. 2011	10 individuos sanos y diestros, 5 hombres y 5 mujeres, 21-32 años.	Investigar los cambios en la ECM y la SICl después de una MVR de 10 segundos del dedo índice, comparando los movimientos de auto-ritmo y externos. Para determinar si los efectos centrales eran específicos de la tarea MVR, se comparó con velocidades de movimiento más lentas que eran cinemáticamente sostenibles	Mostraron como el desempeño de una tarea rítmica de CMV de <i>tapping</i> disminuye rápidamente y es seguido por una disminución de la ECM. Una depresión post-ejercicio similar también ocurre cuando la tarea se realiza a velocidades más lentas sostenibles. Con cada una de estas tareas, la reducción de la excitabilidad se acompaña de un aumento de inhibición cortical de intervalo corto SICl, que es mayor después de las tareas más lentas que la tarea MVR.

Tabla 3. Artículos relacionados con la utilización de ambas tareas (contracción isométrica y *tapping*).

Autor	Muestra	Objetivo	Resultados
Arias et al. 2015	2 grupos. Grupo TMS con 9 sujetos sanos diestros (8 varones y una mujer, rango de edad de 22 a 38 años) y el grupo CMS 12 sujetos sanos diestros varones, rango de edad 18-41 años.	Observar las diferencias sobre el potencial motor y los cambios en la excitabilidad de los circuitos corticales y espinales, entre las tareas ft máximo e iso máxima.	Se observó como la fuerza cayó al final de la sesión para ambas tareas. Para la tarea ft, la fuerza de contracción máxima voluntaria se redujo justo al final. Mientras que para la tarea iso observamos una acumulación de fatiga expresado en la caída CMV de la fuerza.
Rodrigues, Mastaglia, y Thickbroom. 2009	10 sujetos sanos diestros, 4 mujeres y 6 hombres, de entre 21-51 años.	Investigar el cambio en la tasa de movimiento y la amplitud en sujetos sanos que realizan flexión/extensión repetitiva de dedos en una tarea de movimiento voluntario máximo o <i>tapping</i> .	La velocidad máxima de movimiento se mantuvo pocos segundos, mostrando una disminución constante durante toda la tarea, permaneciendo la amplitud de movimiento sin cambios. Los sujetos no pudieron sostener el <i>tapping</i> a velocidad máxima durante más de unos pocos segundos, produciéndose un descenso constante de la frecuencia sin un cambio en la amplitud. No hubo cambios en la fuerza CMV isométrica después de la tarea de MVR, no habiendo pérdida de la capacidad de generación de fuerza.

activación en la corteza motora primaria contralateral. Medido a través de resonancia magnética, durante el *tapping* (ft) a ritmo propio y a máxima velocidad. Una flecha hacia la derecha o izquierda indicaba la mano con la que se debía golpear, el color de la flecha indicaba la velocidad de ejecución (verde, velocidad propia y roja, velocidad máxima). 4 sesiones divididas en 6 bloques de 20s de golpeo, seguido de 20 s de descanso.

Para finalizar Teo et al.¹⁹ buscaron los cambios que se producían en la excitabilidad corticomotora (ECM) y la inhibición cortical de intervalo corto (SICl) al realizar *tapping* de dedos. Los participantes realizaron tres series de movimientos de flexión-extensión cíclica de 10 s (comenzando desde la posición neutral con respecto a la articulación metacarpofalángica (MCP) a diferentes velocidades.

En cuanto a las investigaciones que emplearon ambos protocolos de actuación (Tabla 3) se puede observar como en la investigación de Arias *et al.*¹³ los sujetos se sometieron a dos sesiones para observar las diferencias sobre el potencial motor y los cambios en la excitabilidad de los circuitos corticales y espinales, entre las tareas ft máximo e isométrica máxima. Una sesión donde debían realizar *tapping* golpeando con el dedo índice sobre una placa metálica colocada en un sensor de fuerza. Y, en la otra sesión, una tarea continua isométrica, presionando igualmente sobre el goniómetro.

Por último, Rodríguez *et al.*²⁰ investigaron el cambio en la amplitud y en la tasa de movimiento al realizar *tapping* de dedos. La fuerza de contracción voluntaria máxima (CMV) se midió a través de un transductor de fuerza, realizando una flexión voluntaria máxima del dedo durante 3 s, breve pausa y luego una extensión voluntaria máxima del dedo 3 s. Para obtener la capacidad de generación de fuerza de los flexores y extensores del índice se midió la velocidad de los movimientos de flexión y extensión balística. Para la tarea de movimiento voluntario repetitivo (MVR), se realizaron movimientos de flexión/extensión continuos del dedo índice lo más rápido posible, manteniendo su índice máximo durante un período de 20 s.

Discusión

El objetivo de esta investigación ha sido proporcionar una revisión sistemática sobre la fatiga inducida por tareas de contracción muscular, provocadas por contracciones isométricas o mediante *tapping* de dedos.

Los estudios que utilizan las contracciones isométricas para inducir la fatiga muscular^{9,11,14-17} presentan diversos objetivos a través de los cuales este tipo de metodología permite una amplia variedad de investigaciones. Mediante la aplicación de las contracciones isométricas comparando tareas de fuerza (realizar una contracción fatigante manteniendo una fuerza constante durante un periodo de tiempo) y posición (mantener la posición de una articulación el mayor tiempo posible mientras se soporta una carga inercial) se ha podido comparar los insumos seleccionados con los grupos de neuronas motoras de los músculos flexores del codo⁹. Así como los ajustes fisiológicos que ocurren cuando se realizan dos contracciones fatigantes similares al fallo, para identificar los mecanismos que limitan la duración de la tarea más difícil¹⁷. Además de delimitar la contribución de los mecanismos que provocan el fracaso supraspinales de la tarea durante contracciones submáximas sostenidas, comparando las diferencias específicas de la tarea en los ajustes de la excitabilidad cortical y espinal¹¹.

Los estudios diseñados mediante la aplicación de contracciones máximas voluntarias también tienen un amplio campo de actuación como puede ser probar la excitabilidad motoneuronal¹⁴. Comparar el comportamiento de los reflejos de latencia corta (reflejo H) y latencia prolongada (LLR)¹⁵. En el estudio de Taylor *et al.*¹⁶ se examinó si el desarrollo del componente supraespinal de la fatiga central fue similar durante cuatro protocolos de ejercicio de tres minutos con diferentes niveles de actividad (5 s CMV 5 s recuperación, 15 s CMV 5 s recuperación, 15 s CMV 10 s recuperación y 30 s CMV 5 s recuperación), demostrando un componente supraespinal a la fatiga central producida por una serie de CMVs intermitentes.

La prueba de *tapping* de dedos es una herramienta básica para evaluar los patrones de movimiento rítmico, siendo comúnmente utilizada en evaluaciones clínicas y como parte de protocolos de investigación, incluyendo estudios de imágenes cerebrales^{21,22} y exámenes neurofisiológicos^{23,24}. En cuanto a los estudios que llevaron a cabo tareas de *tapping* para inducir fatiga^{7,12,18,19} se ha podido examinar la validez y fiabilidad de este protocolo mediante dos modos diferentes Fast y Comfort, en diferentes poblaciones (jóvenes, mayores y personas con Parkinson), y reevaluar algunos aspectos metodológicos de su uso⁷.

Este tipo de metodología también se ha utilizado para determinar la conectividad efectiva de la red cortico-cortical sensorimotora contralateral durante las tareas de movimiento de dedos simples y complejos de la mano, aplicando el análisis de causalidad de Granger en las señales de EEG, fMRI y fNIRS. Lutz *et al.*¹⁸ quisieron probar hasta qué punto la mano usada (dominante vs no dominante) determina la cantidad del patrón de activación en la corteza motora primaria contralateral durante el aprovechamiento máximo y conveniente de la velocidad, ya que varios estudios de imágenes cerebrales demostraron consistentemente un aumento de la activación cortical (indexada por el aumento de las respuestas hemodinámicas) como una función de aumento de la frecuencia de movimiento de los dedos en la corteza motora primaria, el cerebelo y en parte en otras áreas motoras^{25,26}.

También se utilizó este tipo de protocolo para investigar los cambios en la excitabilidad corticomotora y la inhibición cortical de intervalo corto después de una tarea de *tapping* de 10 s del dedo índice, comparando los movimientos de auto-ritmo y externos. Para determinar si los efectos centrales eran específicos de la tarea se comparó con velocidades de movimiento más lentas que eran cinemáticamente sostenibles.

Por último, también se encontraron estudios que incluían dentro de su protocolo para inducir fatiga, la utilización, tanto, de tareas de contracciones isométricas como mediante *tapping* de dedos. Como en el estudio de Arias *et al.*¹³ donde se comparó los signos neurofisiológicos de la fatiga inducida por *tapping* con los inducidos por tareas de contracción isométricas, para analizar los mecanismos neurofisiológicos subyacentes de la fatiga durante movimientos repetitivos rápidos (*tapping*). Para determinar así la contribución de algunos circuitos motores espinales y supraspinales a la generación de fatiga durante movimientos repetitivos de corta duración (tocando con los dedos), si se realiza a la velocidad más rápida posible. Además, cuando se han estudiado los movimientos isométricos o isotónicos máximos del dedo, se ha observado que puede haber una relación entre la amplitud y la velocidad²⁷, por ello, Rodríguez *et al.*²⁰ se propusieron investigar el cambio en la tasa de movimiento y la amplitud en sujetos sanos que realizan flexión/extensión repetitiva de dedos en una tarea de movimiento voluntario máximo o *tapping*.

Conclusión

Esta revisión sistemática ha sido planteada para proporcionar información acerca de la fatiga inducida por tareas de contracción muscular, observando como hay un mayor número de investigaciones que utilizan contracciones isométricas en comparación con las que utilizan la metodología de *tapping* de dedos.

La fatiga muscular se ha estudiado predominantemente cuando es inducida por tareas isométricas, pero los mecanismos neurofisiológicos

subyacentes de la fatiga durante movimientos repetitivos rápidos de *tapping* de dedos apenas se han explorado, siendo un procedimiento fiable para evaluar mecanismos fisiológicos y patológicos.

La búsqueda de la metodología planteada en esta revisión (contracciones isométricas y *tapping*) permite abordar el tema de la fatiga, sobre todo a la hora de investigar cómo puede afectar la fatiga en el rendimiento de las personas, así como en el día a día de las personas que sufren patologías donde se desarrolla como un síntoma crónico.

La realización de contracciones isométricas máximas da lugar al fallo progresivo de la activación voluntaria, haciendo que los sujetos sean incapaces de activar los músculos completamente, lo que demuestra la aparición de la fatiga central.

Las contracciones fatigantes intermitentes, como ya se demostró para las contracciones voluntarias sostenidas, provocan cambios en las respuestas de la electromiografía muscular (EMG) a la estimulación magnética transcraneal. Prolongándose el período silencioso y aumentando el tamaño del PEM más rápidamente, recuperándose más lentamente que la prolongación del período de silencio.

La tarea de *tapping* produce una disminución constante en la velocidad a la que se puede realizar el movimiento, teniendo efectos similares sobre la excitabilidad e inhibición tanto después del ejercicio cómo después de una tarea fatigante isométrica de CMV, provocando un deterioro en el rendimiento debido a que no se pueden sostener las demandas en el control motor.

La variedad a la hora de abarcar distintos objetivos que aporta la utilización de este tipo de metodología hace que sea un instrumento muy utilizado por los investigadores que se plantean estudios sobre la diversidad que ofrece el campo de la fatiga.

Conflicto de interés

Los autores no declaran conflicto de intereses alguno.

Bibliografía

- Tucker R, Noakes TD. The physiological regulation of pacing strategy during exercise: A critical review. *Br J Sport Med*. 2009;43(6): e1.
- Vøllestad N. Measurement of human fatigue. *J Neurosci Meth*. 1997;74(2):219-27.
- Bazzucchi I, Marchetti M, Rosponi A, Fattorini L, Castellano V, Sbriccoli P, et al. Differences in the force/endurance relationship between young and older men. *Eur J Appl Physiol*. 2005;93:390-7.
- Taylor JL, Todd G, Gandevia SC. Evidence for a supraspinal contribution to human muscle fatigue. *Clin Exp Pharmacol Physiol*. 2006;33:400-5.
- Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev*. 2001;81:1725-89.
- Gómez-Campos R, Cossio-Bolaños MA, Brouset Minaya M, Hochmuller-Fogaca RT. Mecanismos implicados en la fatiga aguda. *RIMCAFD*. 2010;10(40):537-55.
- Arias P, Robles-García V, Espinosa N, Corral Y, Cudeiro J. Validity of the finger tapping test in Parkinson's disease, elderly and young healthy subjects: is there a role for central fatigue? *Clin Neurophysiol*. 2012;123:2034-41.
- McNeil CJ, Butler JE, Taylor JL, Gandevia SC. Testing the excitability of human motoneurons. *Front Hum Neurosci*. 2013;7:152.
- Klass M, Levenez M, Enoka RM, Duchateau J. Spinal mechanisms contribute to differences in the time to failure of submaximal fatiguing contractions performed with different loads. *J Neurophysiol*. 2008;99(3):1096-104.
- Brasil-Neto JP, Pascual-Leone A, Valls-Sole J, Cammarota A, Cohen LG, Hallett M. Post-exercise depression of motor evoked potentials: a measure of central nervous system fatigue. *Exp Brain Res*. 1993;93:181-4.
- Williams PS, Hoffman RL, Clark BC. Cortical and spinal mechanisms of task failure of sustained submaximal fatiguing contractions. *PLoS One*. 2014;9(3):e93284.
- Anwar AR, Muthalib M, Perrey S, Galka A, Granert O, Wolff S, et al. Effective Connectivity of Cortical Sensorimotor Networks During Finger Movement Tasks: A Simultaneous fNIRS, fMRI, EEG Study. *Brain Topogr*. 2016;29(5):645-60.
- Arias P, Robles-García V, Corral-Bergantinos Y, Madrid A, Espinosa N, Valls-Sole J, et al. Central fatigue induced by short-lasting finger tapping and isometric tasks: A study of silent periods evoked at spinal and supraspinal levels. *Neurosci*. 2015;305:316-27.
- Butler JE, Taylor JL, Gandevia SC. Responses of human motoneurons to corticospinal stimulation during maximal voluntary contractions and ischemia. *Neurosci*. 2003;23(32):10224-30.
- Duchateau J, Balestra C, Carpentier A, Hainaut K. Reflex regulation during sustained and intermittent submaximal contractions in humans. *J Physiol*. 2002;541(Pt 3):959-67.
- Taylor JL, Allen GM, Butler JE, Gandevia SC. Supraspinal fatigue during intermittent maximal voluntary contractions of the human elbow flexors. *J Appl Physiol*. 2000;89:305-13.
- Maluf KS, Enoka RM. Task failure during fatiguing contractions performed by humans. *J Appl Physiol*. 2005;99(2):389-96.
- Lutz K, Koeneke S, Wustenberg T, Jancke L. Asymmetry of cortical activation during maximum and convenient tapping speed. *Neurosci Lett*. 2004;373:61-6.
- Teo WP, Rodrigues JP, Mastaglia FL, Thickbroom GW. Post-exercise depression in corticomotor excitability after dynamic movement: a general property of fatiguing and non-fatiguing exercise. *Exp Brain Res*. 2012;216:41-9.
- Rodrigues JP, Mastaglia FL, Thickbroom GW. Rapid slowing of maximal finger movement rate: fatigue of central motor control?. *Exp Brain Res*. 2009;196:557-63.
- Stoodley CJ, Valera EM, Schmahmann JD. An fMRI study of intra-individual functional topography in the human cerebellum. *Behav Neurosci*. 2010;23(1-2):65-79.
- Foki T, Pirker W, Klingner N, Geissler A, Rath J, Steinkellner T, et al. fMRI correlates of apraxia in Parkinson's disease patients OFF medication. *Exp Neurol*. 2010;225(2):416-22.
- Leijnse JN, Campbell-Kyureghyan NH, Spektor D, Quesada PM. Assessment of individual finger muscle activity in the extensor digitorum communis by surface EMG. *J Neurophysiol*. 2008;100(6):3225-35.
- Astolfi L, Babiloni F, Babiloni C, Carducci F, Cincotti F, Basilisco A, et al. Time-varying cortical connectivity by high resolution EEG and directed transfer function: simulations and application to finger tapping data. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2004;6:4405-8.
- Jancke L, Peters M, Himmelbach M, Nosselt T, Shah J, Steinmetz H. fMRI study of bimanual coordination. *Neuropsychologia*. 2000;38:164-74.
- Toma K, Mima T, Matsuoka T, Gerloff C, Ohnishi T, Koshiy B, et al. Movement rate effect on activation and functional coupling of motor cortical areas. *J Neurophysiol*. 2002;88:3377-85.
- Heuer H. Temporal and spatial characteristics of rapid finger oscillations. *Motor Control*. 2006;10:212-31.