

Revisión crítica del comportamiento de la coherencia corticomuscular en el control motor fino de la fuerza

Eduardo Lattari, Bruna Velasques, Flávia Paes, Marlo Cunha, Henning Budde, Luis Basile, Mauricio Cagy, Roberto Piedade, Sergio Machado, Pedro Ribeiro

Cartografía Cerebral e Integración Sensoriomotora; Instituto de Psiquiatria de la Universidad Federal de Río de Janeiro, IPUB/UFRJ (E. Lattari, B. Velasques, M. Cunha, R. Piedade, S. Machado, P. Ribeiro). Panic & Respiration Laboratory; IPUB/UFRJ (F. Paes). División de Neurocirugía; Universidad de São Paulo, Facultad de Medicina (L. Basile). Laboratorio de Psicofisiología; Facultad de Psicología y Fonoaudiología; UESP (L. Basile). Facultad de Educación Física; Departamento de Biociencias; EEF/UFRRJ (P. Ribeiro). División de Epidemiología y Bioestadística; Instituto de Salud Comunitaria; Universidad Federal Fluminense, UFF; Río de Janeiro (M. Cagy). Instituto de Neurociencia Aplicada, INA; Río de Janeiro (B. Velasques, M. Cunha, S. Machado, P. Ribeiro). Facultad de Psicología; Instituto Brasileño de Medicina y Rehabilitación, IBMR; Río de Janeiro (F. Paes). Facultad de Educación Física; Laboratorio de Comportamiento Motor; Universidad Federal de Vale do São Francisco, UNIVASF; Pernambuco, Brasil (M. Cunha). Departamento de Ciencia del Movimiento y Entrenamiento; Instituto de Ciencias del Deporte; Universidad Humboldt; Berlín, Alemania (H. Budde).

Correspondencia:

Dr. Sergio Eduardo de Carvalho Machado. Rua Professor Sabóia Ribeiro, 69. Apto. 104. Leblon. CEP 22430-130. Río de Janeiro, RJ, Brasil.

E-mail:

secm80@yahoo.com.br

Aceptado tras revisión externa: 30.06.10.

Cómo citar este artículo:

Lattari E, Velasques B, Paes F, Cunha M, Budde H, Basile L, et al. Revisión crítica del comportamiento de la coherencia corticomuscular en el control motor fino de la fuerza. Rev Neurol 2010; 51: 610-23.

© 2010 Revista de Neurología

English version available in www.neurologia.com

Introducción. Entender el funcionamiento del control motor humano constituye una cuestión importante para la neurociencia. Un ejemplo es el modo en que la corteza motora controla la actividad muscular, control que puede observarse a través de la coherencia corticomuscular (CCM).

Objetivo. El presente estudio tiene por objeto comprobar la influencia sobre la CCM de diversos factores relacionados con el control motor fino de las tareas de fuerza. Nuestro interés estribaba en averiguar si sería posible medir la solidez del acoplamiento entre el sistema nervioso central (SNC) y el aparato locomotor a través de los cambios de la actividad oscilatoria en las bandas beta y gamma influida por tales factores, tanto en personas sanas como enfermas.

Desarrollo. La CCM en la banda beta resultó especialmente importante en la ejecución sostenida de las tareas de control preciso, que demandan más concentración y esfuerzo, y constatamos que la CCM en dicha banda estaba influida por diversos factores. Por lo que respecta a la CCM en la banda gamma, su modulación requeriría en principio una integración dinámica compleja y continua de varios mecanismos, puesto que la magnitud de la fuerza no ejerció efecto modulador alguno. De lo dicho se desprende que tales mecanismos serían necesarios para un funcionamiento adecuado y eficaz de las redes neuronales cuando se necesita producir una fuerza dinámica.

Conclusión. La CCM en las bandas beta y gamma podría ampliar nuestros conocimientos acerca de los cambios dinámicos del sistema motor, tanto en las personas sanas como en los pacientes neurológicos. Se podría utilizar como un índice sensible para cuantificar los cambios dinámicos en el control motor fino de la fuerza, y tiene posibilidades de convertirse en una herramienta útil para caracterizar los patrones de cambio en las actividades del SNC en el campo de la investigación básica, especialmente en la restauración de la función motora.

Palabras clave. Banda beta. Banda gamma. Coherencia corticomuscular. Control motor fino. Fuerza. Integración sensoriomotora.

Introducción

Conocer el entramado del sistema de control motor humano constituye una cuestión importante para la neurociencia integrativa. Un ejemplo es el modo en que la corteza motora controla y regula la actividad muscular a través de un proceso de integración sensoriomotora. Este proceso consiste en el procesamiento continuo por parte del sistema motor de las señales sensoriales aferentes con el fin de preparar los actos motores y refinar la ejecución de las tareas motoras finas. Por medio de él, el sistema nervioso central (SNC) integra la información procedente de múltiples canales sensoriales, y permite así la realización de tareas específicas dirigidas a un objetivo, como son las tareas de fuerza [1-3].

La relación entre la actividad de la corteza y la fuerza muscular se ha podido investigar minuciosamente en la neurofisiología del control motor [4-7]

gracias a un método denominado coherencia corticomuscular (CCM) que mide la actividad oscilatoria de las señales cerebrales, señales que están acopladas con la activación muscular en diversas bandas de frecuencia dependiendo de las funciones y tareas en las que esté empeñado el sistema motor. La importancia de la CCM resulta manifiesta si se repasan brevemente los experimentos de neurofisiología sensorial que han demostrado la relevancia funcional de las actividades oscilatorias de las neuronas y de su sincronización en el procesamiento de la información. La correlación temporal entre las redes neuronales localizadas en distintos lugares, expresada matemáticamente en forma de coherencia, se ha propuesto como una correlación neurofisiológica del acoplamiento funcional entre ellas [8,9].

En lo que respecta a esto último, la coherencia se calcula a partir de la señal electromagnética (EMG) rectificadas y de los canales del electroencefalogra-

ma (EEG) que abarcan el área sensoriomotora contralateral a la mano activa (SM1c) y permite calcular la sincronización entre ambas señales mediante las siguientes fórmulas:

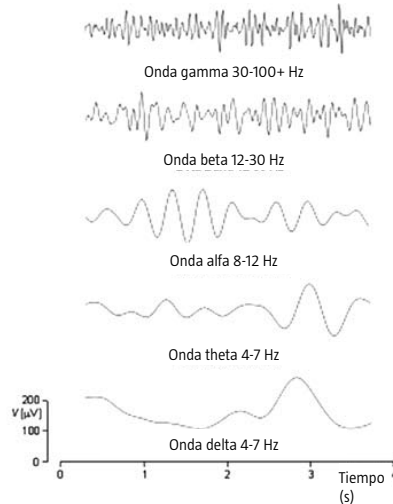
$$\text{Coh}_{c_1,c_2}(f) = \frac{|S_{c_1,c_2}(f)|^2}{|SP_{c_1}(f)| \times |SP_{c_2}(f)|}$$

$$S_{c_1,c_2}(f) = \frac{1^n}{n} \sum_{i=1}^n C1_i(f)C2_i^*(f),$$

en las que $S_{c_1,c_2}(f)$ es el espectro cruzado correspondiente al canal de la señal EEG c_1 y la señal EMG rectificada en el canal c_2 a una determinada frecuencia f , y $SP_{c_1}(f)$ y $SP_{c_2}(f)$ son los espectros de potencia correspondientes a los canales c_1 y c_2 en dicha frecuencia. Para una frecuencia f , la $\text{Coh}_{c_1,c_2}(f)$ corresponde a la potencia cuadrática de un coeficiente de correlación complejo, donde $\text{Coh}_{c_1,c_2}(f)$ es un número real comprendido entre 0 y 1 [10].

Es bien sabido que todo el sistema motor, desde la intención a la acción, implica y requiere una comunicación sólida y, por tanto, la CCM es un eslabón en la cadena de la red motora que comunica la corteza cerebral con el músculo. Asimismo, dado que la coherencia es una correlación entre dos actividades oscilatorias, su análisis puede indicar que la frecuencia a la cual se evidencia es una frecuencia temporizadora (*timer frequency*) habitual del procesamiento de la orden motora [10]. En concordancia con este hecho, la ejecución de un acto motor voluntario es el resultado de las órdenes corticales que dirigen las acciones musculares. La coherencia entre la corteza y el músculo reviste interés para comprender el control cortical de los movimientos voluntarios y la fisiopatología de diversos trastornos motores, así como para desentrañar la significación funcional de los ritmos corticales. El análisis de la CCM puede ser un instrumento útil para entender la conexión corticomuscular en los pacientes aquejados por trastornos del movimiento. Los cambios sin paralelo de las señales intercambiadas por la corteza y el músculo parecen indicar un desacoplamiento entre estas dos señales. Sin embargo, la CCM relacionada con el control motor fino de la fuerza no ha sido objeto hasta el momento de ninguna investigación directa, y entender este fenómeno ayudaría a dilucidar ciertos mecanismos relacionados con los trastornos del movimiento así como a elaborar o implementar terapias destinadas a este tipo de pacientes. Es más, indagar en este aspecto también ampliaría nuestros conocimientos acerca de la neuroplasti-

Figura 1. Ondas cerebrales registradas mediante el electroencefalograma.



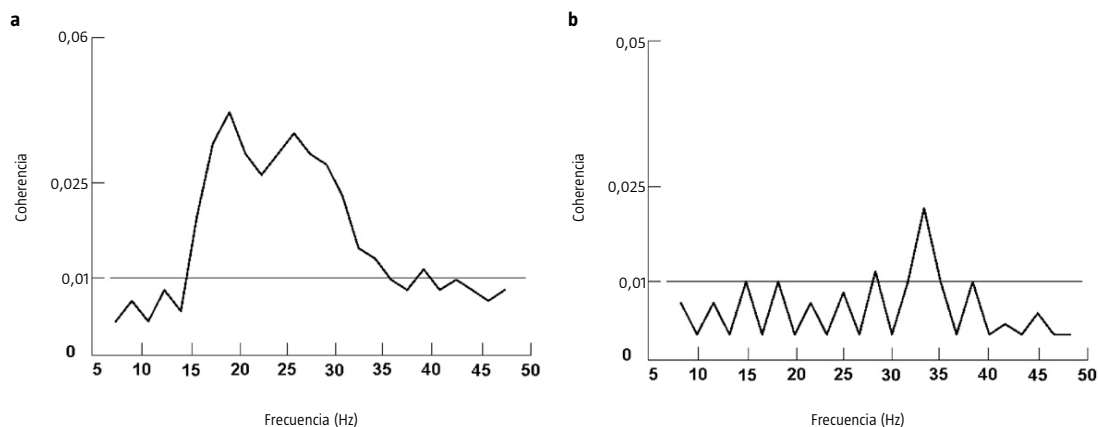
cidad del sistema motor en las personas sanas y, especialmente, en los pacientes neurológicos.

Aunque la base fisiológica de la CCM dista de estar clara, existe un amplio acuerdo de que refleja la comunicación entre el cerebro y el músculo, la cual se considera relacionada con la fuerza de control [11]. En los trastornos del movimiento como los provocados por un ictus [12] se han descrito características anormales en la CCM, lo que apunta a la existencia de alteraciones en la comunicación corticomuscular en los pacientes afectados. El presente estudio tenía como objetivo verificar la influencia sobre la CCM de diversos factores relacionados con el control motor fino de las tareas de fuerza (prensión con los dedos y las manos), como son la magnitud de la fuerza, los recursos de atención, los mecanismos aferentes y la complejidad de la tarea. Nuestro interés estribaba en averiguar si sería posible medir la solidez del acoplamiento entre el SNC y el sistema muscular a través de los cambios de la actividad oscilatoria en las bandas beta y gamma influida por tales factores, tanto en personas sanas como enfermas.

Metodología

El presente artículo revisó la CCM durante la producción de fuerza estática y dinámica en personas sanas y pacientes neurológicos. De acuerdo con los aspectos reseñados, elaboramos una estrategia de búsqueda bibliográfica de estudios en las principales

Figura 2. a) Coherencia corticomuscular durante la producción de fuerza estática en sujetos sanos; b) Coherencia corticomuscular durante la producción de fuerza dinámica en sujetos sanos.



bases de datos médicas. La búsqueda informatizada se llevó a cabo en las bases de datos Pubmed/Medline, ISI Web of Knowledge y Scielo con los siguientes términos de búsqueda: *'beta-band'*, *'corticomuscular coherence'*, *'CCM'*, *'dynamic force'*, *'electromyography'*, *'EMG'*, *'electroencephalography'*, *'EEG'*, *'gamma-band'* y *'static force'*, además de los nombres de expertos de renombre internacional en este campo. Se revisaron preferentemente artículos referentes a revisiones críticas sistemáticas, metaanálisis e informes experimentales publicados en lengua inglesa y llevados a cabo entre los años 2002 y 2009. Los criterios de admisión de los estudios relacionados con nuestras cuestiones fueron: pacientes e individuos sanos diestros; tareas de fuerza estática o dinámica (presión con los dedos y las manos) que implicaran recursos de atención (estímulos visuales, competición de estímulos y tarea de cálculo aritmético), mecanismos aferentes (táctiles y propiocepción), magnitud de la fuerza (niveles de fuerza) o complejidad de la tarea (grado de precisión exigido por la tarea); rendimiento en la tarea, expresado tanto en forma de datos EEG y EMG (CCM en las bandas beta y gamma) como de datos conductuales (medidas de error); y datos adquiridos del área sensoriomotora primaria contralateral o SM1c (electrodo C3).

CCM durante la producción de fuerza estática y dinámica en personas sanas

El término 'onda cerebral' indica de hecho que la actividad EMG del cerebro es de naturaleza oscila-

toria, tal y como se puede apreciar en la figura 1. En personas sanas despiertas, el EEG confirma la actividad en las bandas beta y gamma principalmente a lo largo de la SM1 entre 15 y 35 Hz [13,14]. Dos son los factores importantes descritos que pueden afectar a la CCM: la fuerza muscular y el tipo de movimiento (tónico o fásico). A este respecto, varios estudios han demostrado que cuando se ejerce la contracción voluntaria máxima (contracción fuerte) durante los movimientos lentos [15] y durante o justo después de los movimientos fásicos [16] se puede observar la CCM en la banda gamma [17,18]. Por otro lado, en la contracción tónica débil o moderada así como durante los movimientos rápidos, la CCM por lo general aparece circunscrita enteramente a la banda beta [13,14].

En las tareas de fuerza, la producción de fuerza estática se caracteriza por la sincronización entre la actividad oscilatoria de la corteza motora y la actividad muscular circunscrita principalmente a la banda beta (15-30 Hz), como se observa en la figura 2a [19-22]. El estrecho acoplamiento con los músculos también nos lleva a pensar en la SM1 como un operador integrador que controla la fuerza producida [23], lo que resulta esencial para la rehabilitación de los trastornos del movimiento. Numerosos experimentos han hallado resultados contradictorios: mientras que la CCM en la banda gamma se observa durante la aplicación de intensidades de fuerza máximas y submáximas [17], la CCM en la banda beta (15-30 Hz) se limita a los períodos de contracciones tónicas sostenidas de magnitud pequeña o moderada [15,17,18,21,22,24-27]. No obstante, esta

Tabla I. Coherencia corticomuscular durante la producción de fuerza estática en personas sanas.

	Objetivo	Muestra	Protocolo	Resultados principales
Kristeva-Feige et al [22]	Investigar si la CCM en la banda beta captada por el electrodo C3 varía según los recursos de atención empeñados (tarea de cálculo aritmético) y la complejidad de la tarea que se ha de realizar (precisión de la fuerza ejercida)	$n = 10$	Los sujetos debían mantener una fuerza isométrica constante presionando un transductor de fuerza con su dedo índice dominante partiendo de una situación de reposo total. Un indicador analógico situado frente al sujeto facilitaba la retroalimentación visual relacionada con el nivel de fuerza. La fuerza ejercida fue del 8% de la CVM de cada sujeto, la cual se estableció antes de iniciar la tarea. Se estudiaron tres condiciones distintas: <ul style="list-style-type: none"> – Realización de la tarea con HP – Realización de la tarea con HP y ejecución simultánea de una tarea de cálculo aritmético mental (HPAT: restar 7 consecutivamente comenzando desde 200, 300 o 400); es decir, la atención quedaba dividida entre la tarea motora y la tarea de cálculo mental – Realización de la tarea con una LP: 20% en torno al nivel de fuerza del 8% de la CVM 	Se constató que la CCM de la banda beta en la condición de HP quedaba restringida a los 28 Hz. En la condición de LP la CCM en la citada banda quedaba limitada a los 24 Hz, un valor inferior al de la condición de HP. Esta circunstancia también parece ocurrir en la CCM de la banda beta en la condición de HPAT debido al mayor grado de atención que entraña la tarea motora. Se observó que la CCM en la banda beta representa un estado de la red corticomuscular en el que la atención (esto es, los estímulos visuales) está dirigida hacia la tarea motora. Este hecho se asocia con, y posiblemente codifica, la precisión durante la producción de la fuerza
Safri et al [36]	Investigar si la CCM en la banda beta captada por el electrodo C3 varía según los recursos de atención empeñados (estímulos visuales) durante la ejecución de una tarea isométrica entre las condiciones con y sin estimulación visual de distracción	$n = 9$	Se pidió a los sujetos que sostuvieran entre el pulgar y el índice un dispositivo con un sensor dinamométrico ubicado en su centro y que apretaran el dispositivo hasta provocar una pequeña contracción (~15% de la CVM). El primer experimento constaba de una condición en la que debían realizar una tarea visual y de sendas condiciones previa y posterior a ésta. Las condiciones control (es decir, antes y después de la tarea visual) exigían que el sujeto mantuviera la contracción muscular sin estimulación visual. En esta tarea se pidió a los participantes que ignoraran los estímulos durante la contracción muscular	Se observó un aumento significativo de la magnitud de la CCM en la banda beta durante la condición de tarea visual en comparación con las condiciones control. Los resultados sugieren que la CCM reflejó el esfuerzo cognitivo necesario para mantener una fuerza isométrica constante cuando era necesario ignorar los estímulos visuales, aumentando el esfuerzo cognitivo y la CCM
Safri et al [37]	Investigar la CCM en la banda beta captada por el electrodo C3 para estudiar los recursos de atención (estímulos visuales, competición de estímulos y tarea de cálculo aritmético), es decir, la división de la atención que tiene lugar en el cerebro durante la ejecución de una tarea motora y los efectos que la división y la no división de la atención ejercen sobre una tarea de fuerza con estimulación visual	$n = 10$ (exp. 1) $n = 5$ (exp. 2)	Se pidió a los participantes que sostuvieran entre el pulgar y el índice un dispositivo con un sensor dinamométrico ubicado en su centro y que apretaran el dispositivo hasta provocar una pequeña contracción (~10% de la CVM). El primer experimento constaba de una condición en la que debían realizar una tarea visual (esto es, ignorar o contar) y de sendas condiciones previa y posterior a ésta. Las condiciones control (es decir, antes y después de la tarea) exigían que el sujeto mantuviera la contracción muscular sin estimulación visual. En esta tarea se pidió a los participantes que ignoraran los estímulos y que contaran ciertos estímulos durante la contracción muscular. El segundo experimento seguía el mismo patrón, pero la tarea consistía en un cálculo aritmético, en concreto, una resta sencilla	En las condiciones de ignorar y contar se observó un aumento significativo de la magnitud de la CCM en la banda beta respecto a las condiciones previa y posterior. Por su parte, en la condición de tarea de cálculo aritmético se constató una reducción significativa de la magnitud de la CCM en la banda beta en comparación con las condiciones control. La CCM en la citada banda se mantenía o aumentaba durante la contracción isométrica en presencia de estimulación visual, lo que podría ser facilitado por la supresión de la atención a los estímulos visuales irrelevantes para la tarea motora y la supresión del procesamiento de los estímulos objeto de atención
Witte et al [14]	Investigar si el aumento de la magnitud de la fuerza estática producida (niveles de fuerza) está asociado con la potenciación de la CCM en la banda beta captada por el electrodo C3	$n = 8$	Los sujetos tenían que modular periódicamente una fuerza dinámica isométrica (equivalente al 4% y al 16% de la CVM) producida por un manipulando. Como retroalimentación visual del nivel de fuerza, los sujetos debían mantener un cursor visual dentro de una zona diana con su índice derecho	Se observó un aumento significativo de la amplitud de la CCM en la banda beta al pasar del 4% al 16% de la CVM que estuvo asociado a un rendimiento mejor (errores relativos más pequeños). Quedó demostrado así que la CCM en la banda beta puede actuar como un eficaz proceso de integración sensoriomotora gracias al enlace más estrecho entre las neuronas corticales y las motoneuronas a fin de estabilizar la comunicación corticoespinal durante la compensación isométrica de fuerzas estáticas de baja intensidad

Tabla I. Coherencia corticomuscular durante la producción de fuerza estática en personas sanas (cont.).

Objetivo	Muestra	Protocolo	Resultados principales	
Kristeva-Feige et al [19]	Investigar si la CCM en la banda beta captada por el electrodo C3 varía en función de la complejidad de la tarea (precisión de la fuerza ejercida)	$n = 8$	Los sujetos tenían que modular periódicamente una fuerza dinámica isométrica (equivalente al 4% de la CVM) producida por un manipulando. Como retroalimentación visual del nivel de fuerza, los sujetos tenían que mantener un cursor visual dentro de una zona diana con el índice derecho	Se constató un aumento en la amplitud de la CCM en la banda beta vinculado al rendimiento en la tarea, es decir, a la señal de error entre la fuerza a realizar y la fuerza realmente ejercida. Este resultado apunta a la existencia de una eficaz interacción corticoespinal durante el transcurso de la fuerza estática y la tarea de prensión precisa

CCM: coherencia corticomuscular; CVM: contracción voluntaria máxima; HP: precisión elevada; LP: precisión baja.

CCM en la banda beta depende claramente de la tarea realizada, pues sólo aparece durante la fase de sostenimiento (*hold phase*) y resulta abolida durante la fase de rampa (*ramp phase*) de una tarea de prensión precisa [11,15,27,28]. Diversos estudios han demostrado que la CCM en la banda beta está modulada por la información aferente [29-33] y las tareas visuomotoras [34].

Por su parte, en las tareas de fuerza el *output* motor dinámico se caracteriza por la sincronización entre la actividad oscilatoria de la corteza motora y la actividad muscular restringida a la banda gamma (30-45 Hz). En la condición de fuerza dinámica, la CCM más clara se produce en la banda gamma, mientras que en la banda beta aparece notablemente reducida, como se puede apreciar en la figura 2b. También se ha conjeturado que para el control de las fuerzas dinámicas el sistema sensoriomotor resuena en la banda gamma para integrar rápidamente la información visual y propioceptiva y generar la orden motora apropiada [35]. En definitiva, el papel funcional de los mecanismos que influyen en la sincronización de la actividad oscilatoria de la corteza motora y la actividad muscular queda por dilucidar.

En este contexto, algunos estudios demuestran que la CCM en la banda beta puede estar modulada por distintos factores relacionados con el control motor fino de la fuerza tales como diferentes magnitudes de fuerza (niveles de fuerza) [14], recursos de atención (estímulos visuales [22,36], competición de estímulos y tarea de cálculo aritmético [37]) y la complejidad de la tarea (nivel de precisión de la tarea [19,22]), como se observa en la tabla I. Por su parte, otros estudios han demostrado que la CCM en la banda gamma (30-45 Hz) aparece asociada con la compensación isométrica de la fuerza dinámica baja

–4% de la contracción voluntaria máxima (CVM)–, y podría facilitar la integración rápida de los recursos de atención (estímulos visuales) y los mecanismos aferentes (información táctil y propioceptiva) [13,38], aparte de la significativa CCM en la banda beta ampliamente observada salvo en el estudio de Chakarov et al [39], quienes hallaron una CCM significativa en una amplia banda (15-45 Hz) que abarcaba las bandas beta y gamma y que estaba relacionada con la intensidad de la fuerza. En la banda gamma no se ha encontrado ninguna modulación significativa de la CCM en la banda gamma vinculada a la magnitud de la fuerza (niveles de fuerza) [13,38,39], como puede se puede ver en la tabla II.

CCM durante la producción de fuerza estática y dinámica en pacientes con trastornos del movimiento

En el campo del control motor, un problema fundamental estriba en cuantificar la señal cerebral que modula la fuerza ejercida en una tarea de control motor fino como es la prensión manual. En este contexto, se ha prestado una atención especial a la organización funcional del sistema corticoespinal y a los mecanismos de control muscular del SNC, en particular al mecanismo universal de interacción neuronal por medio de la sincronización, el cual desempeña un papel relevante en la coordinación eficaz entre las áreas motoras corticales y la musculatura. En lo que concierne a ello, es importante y necesario conocer el acoplamiento funcional existente entre las órdenes corticales y la consiguiente activación muscular en los trastornos del movimiento. Por todos es sabido que los déficits motores constituyen una grave consecuencia de varios trastornos del movimien-

Tabla II. Coherencia corticomuscular durante la producción de fuerza dinámica en personas sanas.

	Objetivo	Muestra	Protocolo	Resultados principales
Omlor et al [13]	Investigar si la magnitud de la fuerza dinámica producida (diferentes niveles de fuerza) requiere un procesamiento sensoriomotor más complejo y, por ende, se ve acompañada de oscilaciones en la CCM de la banda gamma captada por el electrodo C3	n = 8	Los sujetos tenían que modular periódicamente una fuerza dinámica isométrica (fuerza equivalente al 4% de la CVM) producida por un manipulando a una frecuencia de 0,7 Hz y con una amplitud entre picos del 1,6% de la CVM. Como retroalimentación visual del nivel de fuerza, los sujetos debían mantener un cursor visual dentro de una zona diana con su índice derecho	Se observó un aumento significativo de la CCM en la banda gamma en la condición de fuerza dinámica. Este resultado demostró que durante la fuerza dinámica el modo de oscilación corticoespinal del sistema sensoriomotor se desplaza hacia frecuencias superiores (principalmente la banda gamma) para integrar rápidamente la información visual y somatosensorial necesaria para producir la orden motora apropiada
Andrykiewicz et al [38]	Averiguar si la modulación de la magnitud de la fuerza dinámica producida (diferentes intensidades de fuerza) influye en la CCM gamma captada a través del electrodo C3	n = 8	Los sujetos tenían que modular periódicamente una fuerza dinámica isométrica (fuerza equivalente al 4% de la CVM) producida por un manipulando. La tarea se componía de tres condiciones experimentales distintas: <ul style="list-style-type: none"> – Condición de fuerza estática – Condición de fuerza dinámica pequeña, a una frecuencia de 0,7 Hz y con una amplitud entre picos del 1,6% de la CVM – Condición de fuerza dinámica grande, a una frecuencia de 0,7 Hz y con una amplitud entre picos del 4% de la CVM 	No se observó ninguna CCM significativa en la banda gamma en condiciones de fuerza dinámica grande o pequeña. Se ha sugerido que sería necesaria una integración dinámica más compleja y continua de recursos de atención más elevados (estímulos visuales) así como de mecanismos aferentes (información táctil y propioceptiva) e información cognitiva para modular la CCM en la banda gamma. Tales mecanismos serían necesarios para conseguir un funcionamiento adecuado y eficaz de las redes neuronales cuando es preciso producir una fuerza dinámica
Chakarov et al [39]	Comprobar si la magnitud de la fuerza dinámica producida (diferentes intensidades de fuerza) interfiere con la CCM en la banda gamma captada a través del electrodo C3	n = 7	Los sujetos tenían que modular periódicamente una fuerza dinámica isométrica (fuerza equivalente al 4% de la CVM) producida por un manipulando a una frecuencia de 0,7 Hz y con una amplitud entre picos del 1,6% de la CVM. Como retroalimentación visual del nivel de fuerza, los sujetos debían mantener un cursor visual dentro de una zona diana con su índice derecho. La tarea constaba de tres condiciones experimentales distintas: fuerza dinámica del 8, 16 y 24%	Se observó una modulación significativa en la banda gamma. Por otro lado, se halló CCM en una amplia banda que abarcaba las bandas beta y gamma. Se ha conjeturado que el sistema sensoriomotor podría requerir una CCM más sólida y más amplia de la banda beta para producir una interacción corticoespinal estable durante la ejecución de una fuerza intensa, así como cuando se compensan fuerzas dinámicas moduladas. Esto refuerza la significación de la CCM en la banda beta en el proceso de integración sensoriomotor, lo que demuestra que en este proceso no sólo es importante la CCM en la banda gamma

CCM: coherencia corticomuscular; CVM: contracción voluntaria máxima.

to como el ictus. Sin embargo, por lo general se cree que dichos trastornos interrumpen o dañan las redes neuronales que controlan los movimientos. Además, poco se sabe acerca de la influencia ejercida sobre la CCM por diversos factores relacionados con el control motor fino de las tareas de fuerza en presencia de trastornos del movimiento.

En dicho contexto, Patino et al [35] investigaron y demostraron que, en lo que concierne al control de las fuerzas dinámicas, la planificación del *output* motor adecuado precisa información aferente, lo que respalda la idea de que los mecanismos aferentes (es decir, la información propioceptiva) resultan imprescindibles para la génesis de la CCM en la banda gamma durante la generación y el control de las fuerzas exclusivamente dinámicas. Los participantes sanos, a diferencia del único paciente neuro-

lógico del estudio, presentaban una CCM significativa en dicha banda. Este equipo de investigación halló la consabida CCM significativa en la banda beta tanto en las personas sanas como en el paciente neurológico (Fig. 3 y Tabla III).

Discusión

La finalidad del presente estudio consistió en verificar la influencia que ejercen sobre la CCM determinados factores relacionados con el control motor fino de las tareas de fuerza (presión con los dedos y las manos), en concreto la magnitud de la fuerza, los recursos de atención, los mecanismos aferentes y la complejidad de la tarea. Nuestro interés se centraba en averiguar si sería posible medir el acopla-

Figura 3. a) Coherencia corticomuscular durante la producción de fuerza estática en un paciente neurológico; b) Coherencia corticomuscular durante la producción de fuerza dinámica en un paciente neurológico.

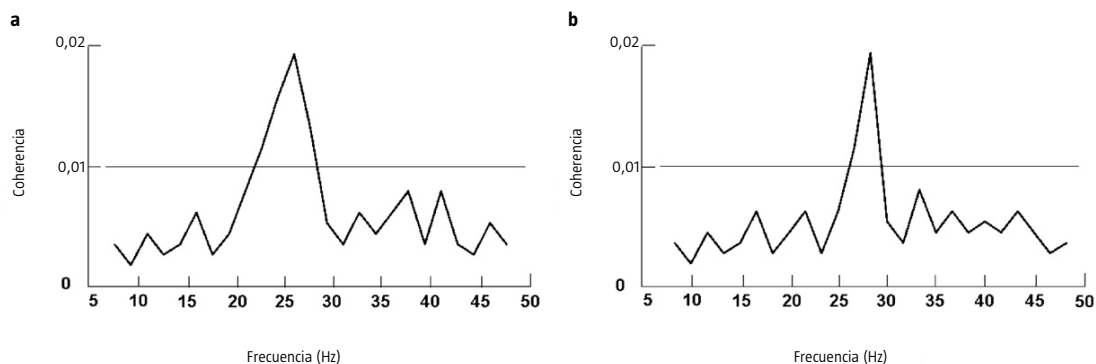


Tabla III. Coherencia corticomuscular durante la producción de fuerza estática y dinámica en pacientes con trastornos del movimiento.

	Objetivo	Muestra	Protocolo	Resultados principales
Patino et al [35]	Analizar el papel de los mecanismos aferentes (esto es, la retroalimentación propioceptiva aferente) en la generación de la CCM en la banda gamma captada por el electrodo C3 durante la compensación isométrica de fuerzas dinámicas	$n = 6$ (controles de igual edad y sexo) $n = 1$ (polineuropatía)	Los sujetos tenían que modular periódicamente una fuerza dinámica isométrica (fuerza equivalente al 4% de la CVM) producida por un manipulando a una frecuencia de 0,7 Hz y con una amplitud entre picos del 1,6% de la CVM. Como retroalimentación visual del nivel de fuerza, los sujetos tenían que mantener un cursor visual dentro de una zona diana con el índice derecho	En la condición de fuerza dinámica, las personas sanas manifestaron un aumento significativo de la CCM en la banda gamma, a diferencia del paciente. Los autores llegaron a la conclusión de que los mecanismos aferentes (información propioceptiva) son imprescindibles para la génesis de la CCM en la banda gamma durante la generación y el control de las fuerzas dinámicas

CCM: coherencia corticomuscular; CVM: contracción voluntaria máxima.

miento entre el SNC y el sistema muscular a través de los cambios de la actividad oscilatoria en las bandas beta y gamma influida por tales factores, tanto en personas sanas como enfermas. Fruto de este estudio, constatamos que la CCM en la banda beta está influida por diversos factores, a diferencia de lo que sucede con la CCM en la banda gamma. El presente apartado de discusión se divide en subapartados en los que se analiza la participación de cada factor en el control motor fino de la fuerza.

Recursos de atención

Cuando se observan los recursos de atención, la CCM en la banda beta disminuye significativamente cuando la atención se divide entre la tarea moto-

ra y otra tarea ejecutada simultáneamente, resultando que sugiere que la CCM en dicha banda podría reflejar la atención prestada a la tarea motora. Este hecho se observó cuando los sujetos ejecutaban la contracción isométrica al tiempo que efectuaban mentalmente cálculos aritméticos (esto es, un esfuerzo cognitivo elevado) [22,37]. La constatación de que la CCM en la banda beta disminuye cuando la atención se reparte entre distintas tareas respalda la hipótesis de su participación activa en el control motor [11,15,40] y no refleja el 'ritmo perezoso' que llegó a plantearse en su momento [41,42]. En este contexto, la CCM en la banda beta se ha considerado como un indicador del reclutamiento eficiente de las motoneuronas asociado a un mínimo grado de esfuerzo de cálculo [28,43].

Por su parte, cuando la atención se divide entre la tarea motora y otra tarea ejecutada simultáneamente, la CCM en la banda beta no disminuye (o sea, aumenta) cuando los sujetos necesitan atender a la estimulación visual y la acción motora (es decir, en situación de contar; esfuerzo cognitivo menor) [22,36]. Asimismo, cuando no era necesario dividir la atención (indicación de ignorar; esfuerzo cognitivo nulo) se observó una potenciación de la CCM en la banda beta [22,36,37]. Todos los cambios acaecidos en la CCM de la banda beta se debieron a la intensidad de la fuerza cuando los sujetos llevaron a cabo la contracción isométrica con igual fuerza. El grado de atención prestado a la tarea de contracción isométrica –total, reducida o nula– probablemente causó la variación en la CCM de la banda beta (aumento o disminución). En fechas recientes, se ha evidenciado que la CCM en la banda beta depende de la dificultad de ejecución de la tarea motora [44] y, por consiguiente, si es preciso incrementar el esfuerzo cognitivo para mantener una fuerza de prensión constante durante la estimulación visual, ello se verá reflejado en la potenciación de la CCM en la banda beta.

Nivel de precisión

En relación con el grado de precisión exigido, uno de los estudios [22] hallados durante la búsqueda informatizada evidenciaba reducciones en la CCM de la banda beta cuando se investigaban distintos grados. La condición experimental de baja precisión difería de la condición de alta precisión en que los sujetos no debían prestar tanta atención a la precisión de la fuerza requerida. En este contexto, Baker et al [27] plantearon dos mecanismos distintos para la generación de las oscilaciones en el sistema motor: el primer mecanismo hipotético consistiría en la presencia de *chattering cells* similares a las descritas en el sistema visual [45] y poseedoras de propiedades de membrana intrínsecas que las dotarían de un patrón de descarga periódico con una frecuencia de descarga comprendida entre 20 y 70 Hz. Si tales células existieran en la corteza motora podrían ser las responsables de las oscilaciones de la banda beta. El segundo mecanismo propuesto por dicho grupo consistiría en una función de red dinámica para la generación de las oscilaciones que ha demostrado ser dependiente de la actividad de las interneuronas inhibitorias. Los cambios en los retrasos de conducción inhibitorios y en la evolución temporal de los potenciales inhibidores postsinápticos podrían propiciar un desplazamiento de la frecuencia de las oscilaciones de la red. Si se tienen en cuenta ambos

mecanismos, la dispar CCM observada en la banda beta bajo las condiciones de baja y alta precisión podría atribuirse a propiedades intrínsecas de las susodichas *chattering cells*, que estarían moduladas por la precisión, o bien a cambios modulados por la precisión en la función de red dinámica controlada por las interneuronas inhibitorias. Los resultados indican que ambas manipulaciones modifican aparentemente la CCM en la banda beta, aunque de dos formas distintas y, además, parecen indicar que la CCM en dicha banda está asociada, y posiblemente codifica, la precisión de la fuerza producida.

En el análisis del otro estudio [19], el aumento de la CCM en la banda beta entre el rendimiento de la fuerza por alcanzar y la fuerza ejercida apunta a la hipótesis de que la significación funcional de la CCM en la banda beta estriba en promover una interacción corticoespinal eficaz, lo que facilita un marco que permite explicar diversos hallazgos: las oscilaciones están abolidas durante los movimientos fásicos y sólo aparecen cuando los músculos se hallan en contracción estática [15,28,46], lo que sugiere que las oscilaciones de la banda beta pueden constituir una forma de recalibración de la relación longitud-tensión y de preparación para el siguiente movimiento [33,46,47]. Asimismo, Pérez et al [34] observaron un aumento de la CCM en la banda beta tras el aprendizaje de una habilidad visuomotora y plantearon que dicho aumento evidenciaría un control cortical más estrecho de la actividad muscular en relación con la adquisición de la tarea, aunque el control cortical más riguroso de la actividad muscular podría reflejar una interacción corticoespinal más eficiente.

Intensidad de la fuerza

Estudios previos han demostrado que la producción de fuerza estática se ve acompañada por la CCM en la banda beta [11,15,16,20,21,25,28]. En consonancia con estos resultados, Witte et al [14] observaron un aumento significativo de la amplitud de la CCM en la banda beta cuando se pasaba del 4 al 16% de la CVM, que estuvo asociado con una mejor ejecución (errores relativos más pequeños). Tres son las interpretaciones alternativas que se pueden plantear para explicar esta mayor amplitud de la CCM observada con el 16% de la CVM:

- Los movimientos correctores más amplios en la condición experimental del 4% de la CVM pueden atenuar la CCM.
- El ajuste de la frecuencia de descarga de la unidad motora hacia el segmento inferior de la banda beta podría en teoría potenciar la CCM du-

rante la aplicación de un 16% de la CVM, aunque dos resultados rebaten esta hipótesis: por un lado, las unidades motoras situadas en el primer músculo interóseo dorsal comienzan a descargar con una frecuencia media de $8,4 \pm 1,3$ Hz y esta frecuencia aumenta $1,4 \pm 0,6$ Hz por cada variación de 100 g en la fuerza [48], y, por otro, el reclutamiento de nuevas unidades motoras fue el principal mecanismo de producción de la fuerza cuando ésta era de baja intensidad. En vista de lo anterior, los autores suponen que la fuerza media de 250 g durante la aplicación del 16% de la CVM probablemente esté relacionada con frecuencias de descarga inferiores a 15 Hz.

- Y la tercera y más razonable en nuestra opinión: el aumento de la amplitud de la CCM en el segmento inferior de la banda beta con el 16% de la CVM respecto al 4% de la CVM parece indicar un vínculo más estrecho entre las neuronas corticales y motoras. Estudios anteriores también habían constatado que las oscilaciones beta de baja frecuencia durante la ejecución de tareas visuomotoras enlazan varias zonas corticales en una gran red y resultan particularmente adecuadas para fomentar el procesamiento eficaz de la información [9,49].

En el marco del procesamiento eficaz es importante destacar que la mayor CCM en la banda beta estuvo acompañada por una mejor ejecución motora. Este hecho resultó cierto con el 16% de la CVM, como confirma el menor error relativo en la fuerza si se compara con el correspondiente al 4% de la CVM. Asimismo, dentro de cada período de condición el error absoluto más pequeño tendió a estar asociado con una mayor CCM en la banda beta. Este hecho concuerda con el reciente estudio de Kristeva-Feige et al [19], en el que la buena ejecución apareció vinculada a valores significativamente más altos de CCM en la banda beta. Esta relación también demostró ser cierta en el caso contrario: la ausencia de retroalimentación periférica, como la que se da en un paciente desaferenciado [50], afectó negativamente a la CCM y al rendimiento en la ejecución. Estos resultados sugieren que la mayor amplitud de la CCM en conjunción con el menor error de ejecución está relacionada funcionalmente con la comunicación eficaz entre la SM1 y el músculo. En resumen, queda demostrado que la CCM en la banda beta aumenta cuando se pasa del 4 al 16% de la CVM y, de manera similar, dentro de cada condición cuando se pasa de períodos de rendimiento 'malo' a 'bueno'. Se ha sugerido que este aumento de la amplitud de la CCM es el resultado de un bucle

sensoriomotor más eficaz que conlleva un mejor rendimiento motor, pero en su lugar el papel funcional de la CCM en la integración sensoriomotora, como han propuesto otros autores [32,33,49,51], parece razonable. Estos procesos integradores probablemente sirven para ajustar el rendimiento motor y, por tanto, son muy importantes para conseguir el control motor adecuado.

Por otra parte, se ha observado que la compensación isométrica de las modulaciones de la fuerza dinámica se ve acompañada por un desplazamiento de la CCM en la banda gamma. En particular se cree que la banda gamma proporciona un mecanismo de enlace de los elementos corticales relacionados con la funcionalidad como sucede en la atención visual [52], la planificación motora [53,54], la integración sensorial [55,56], sensoriomotora y visuomotor [57,58] y la cognición [59]. En comparación con la fuerza estática, el seguimiento (*tracking*) isométrico exacto de la fuerza modulada periódicamente demanda más recursos de atención y una integración dinámica más compleja y continua de la información visual y somatosensorial. Si tenemos esto en cuenta, el desplazamiento de la CCM en la banda gamma podría reflejar la integración de la compleja información táctil, propioceptiva y visual en un programa motor adecuado y su transmisión efectiva a las motoneuronas espinales.

Por lo que respecta al papel de la CCM, Marsden et al [60] han sugerido que ésta parece aunar eficazmente determinados elementos corticales en el acto motor, tendiendo a desplazarse hacia nuevas frecuencias cuando se realizan tareas diferentes, aunque éstas impliquen a los mismos músculos. No obstante, Omlor et al [13] demostraron claramente que el desplazamiento significativo de la CCM en la banda gamma está relacionado con las diferentes condiciones de fuerza. Además de esta constatación, Macefield et al [61] afirman que especialmente las señales aferentes táctiles parecen capaces de generar un cambio oportuno en la fuerza ejercida como respuesta a un cambio impuesto en la fuerza de carga. Así, Omlor et al [13] demostraron que la oscilación de las redes corticoespinales en la CCM de la banda gamma podría facilitar la rápida integración de la información táctil, propioceptiva, visual y cognitiva (esto es, predicción y planificación) durante la compensación isométrica de una fuerza dinámica. Por consiguiente, se observó una CCM en la banda gamma durante una tarea más compleja pero predecible con un diseño periódico. Esto parece indicar que la CCM en la banda gamma actuaría predominantemente en la producción de fuerza dinámica y predecible como un mecanismo para

integrar la información de retroalimentación visual y especialmente la cognitiva, así como la somatosensorial, con el fin de garantizar una respuesta motora adecuada. Todos estos hallazgos tienen implicaciones para el protagonismo de la CCM en el control motor fino y preciso.

En consonancia con lo anterior, los resultados de Andrykiewicz et al [38] demuestran que la amplitud de la fuerza dinámica no modula la CCM en la banda gamma. Este equipo de investigadores constató que durante el control de las tareas complejas la modulación del sistema sensoriomotor se sincronizaba en la banda gamma a fin de integrar rápidamente la información visual, propioceptiva, táctil y cognitiva (es decir, predicción y planificación), tal y como sucedía en el experimento de Omlor et al [13]. En este ámbito, las observaciones de Andrykiewicz et al [38] referentes a que la amplitud de la fuerza dinámica no modula la CCM en la banda gamma, parecen indicar que los cambios en el *input* propioceptivo durante la ejecución de fuerzas dinámicas en el intervalo comprendido entre el 1,6 y el 4% de la CVM no son suficientemente distintas para propiciar esta modulación. Se supone que las neuronas de la corteza motora y las motoneuronas espinales están sincronizadas en la banda gamma en ambas condiciones dinámicas respecto a la condición de fuerza estática. Además, el grado de este desplazamiento fue el mismo en ambas condiciones dinámicas, lo que permite afirmar que las condiciones de fuerza dinámica, ya sean grandes o pequeñas, demandan el mismo nivel de integración sensoriomotora y visual. Esta conclusión concuerda con el rendimiento motor parecido que se observó con ambas condiciones dinámicas, evidenciado por los errores relativos semejantes. Tales resultados estuvieron más bien asociados al estado interno del sistema sensoriomotor, como avala la ausencia de cambios en el error relativo entre ambas condiciones dinámicas.

Por el contrario, el estudio de Chakarov et al [39] halló un aumento significativo de la CCM en una amplia banda (15-45 Hz) que abarcaba las bandas beta y gamma y que era paralelo a la intensidad de la fuerza. Los datos previos acerca de la CCM en la banda beta cuando el nivel de fuerza estática aumenta del 4% de la CVM al 16% [14] se ven ampliados para la compensación isométrica de la fuerza modulada aumentada, lo que sugiere que la CCM en la banda beta podría servir para estabilizar la comunicación corticoespinal durante la compensación isométrica de las fuerzas estáticas de baja intensidad. A pesar de lo anterior, los resultados de Chakarov et al [39] avalan la opinión de que esta función de la CCM en la banda beta no está limita-

da ni es específica exclusivamente de las fuerzas estáticas de baja intensidad. Además, el sistema sensoriomotor podría recurrir a una CCM en la banda beta más sólida a la par que amplia para generar una interacción corticoespinal estable durante una fuerza de intensidad creciente, incluso en aquellos casos en los que tengan que compensarse fuerzas dinámicas moduladas.

Los procesos de CCM tienen una presencia generalizada en el SNC a diversos niveles de organización neuronal y en diferentes procesos cognitivos [62]. El conocimiento detallado de los cometidos funcionales de la CCM en las diferentes bandas de frecuencia supondría un gran avance en el control motor. Un examen exhaustivo de los datos publicados hasta el momento revela la existencia de múltiples funciones más que de roles funcionales específicos para cada banda de frecuencia. Este dato está en consonancia con una relación 'una a varias' en la que la CCM en una frecuencia dada podría estar involucrada en distintas funciones y viceversa. El estudio de Omlor et al [13] ha contribuido a este debate mostrando que durante la compensación isométrica de las fuerzas dinámicas y estáticas de bajo nivel se observa CCM en las bandas beta y gamma, respectivamente. Por esta razón, los resultados de Chakarov et al [39] avalan la multiplicidad de funciones de la CCM en la banda beta, lo que se correlaciona positivamente con el grado de modulación dinámica de la fuerza. Por ello sugieren que la CCM es un proceso altamente dinámico que desempeña múltiples funciones y que compete específicamente a las bandas beta o gamma según las particularidades de la tarea motora.

Mecanismos aferentes

Por lo que respecta a los mecanismos aferentes (esto es, la información propioceptiva) Patino et al [35] no hallaron una CCM significativa en la banda gamma en condiciones de fuerza dinámica en un paciente desafiado, pero sí una modulación significativa de la CCM en la banda beta en la condición de fuerza estática. A pesar de ello, el rendimiento del paciente resultó significativamente peor que el de los individuos control en ambas condiciones. En este contexto, las personas sanas que conformaban el grupo control presentaron CCM significativas en las bandas beta y gamma tanto en condiciones de fuerza estática como dinámica. Aunque el flujo de entrada aferente podría modular la CCM en la banda beta, los datos concilian la opinión de que la información motora eferente basta por sí sola para generar la CCM en dicha banda durante la ejecución de una fuerza estable. En fechas recién-

tes Gerloff et al [63] identificaron claramente la SM1 en pacientes con lesiones cerebrales recientes y aportaron pruebas de que la CCM en la banda beta representa los impulsos eferentes procedentes de la SM1 y no el procesamiento de retroalimentación reaférente.

El control de la fuerza dinámica requiere información aferente para planificar el *output* motor adecuado, el cual se traducirá lógicamente en un mejor rendimiento. En este sentido, la información propioceptiva y el rendimiento están íntimamente relacionados con la generación de la CCM en la banda gamma. Si la información sensorial periférica no está presente, sólo resta la retroalimentación visual. Como han demostrado Omlor et al [13], las demandas elevadas sobre la SM1, más variables a lo largo del tiempo y dependientes de la atención prestada, están acompañadas por la CCM en la banda gamma, en contraste con lo que sucede con las fuerzas de naturaleza estática [64]. Dichos autores afirman que el control de las fuerzas dinámicas puede precisar una asociación de varios factores para anticipar las modulaciones de la fuerza dinámica y planificar el *output* motor apropiado. Sin embargo, a diferencia de Omlor et al [13], la tarea utilizada por Patino et al [35] es más compleja, porque exige el *tracking* continuo de una fuerza modulada periódicamente, cuya ejecución requiere el uso de la propiocepción y la retroalimentación visual. Se ha demostrado que la rapidez de la respuesta y la planificación motora son procesos que dependen en gran medida de la retroalimentación propioceptiva, esto es, de la información cutánea, articular, tendinosa y muscular, parámetros que no se pueden obtener directamente de la retroalimentación visual. Y en efecto, se ha demostrado que la descarga de señales aferentes en respuesta a los eventos de presión mecánica con los dedos suministra información sobre estos eventos con la suficiente rapidez para explicar el uso de las señales táctiles en la manipulación natural [65]. Es más, las señales aferentes táctiles de la piel son capaces de desencadenar un cambio adecuado en la fuerza ejercida como respuesta a un cambio impuesto en la fuerza de carga, mientras que las señales aferentes de los músculos y las articulaciones pueden facilitar información relacionada con las fuerzas reactivas producidas por el sujeto [66].

Además, se esperaba que el paciente desaférenciado manifestase una modulación de la CCM en la banda gamma, aunque estuviera basada únicamente en la retroalimentación visual en la tarea dinámica más exigente, pero dicha retroalimentación no bastó para ejecutar la tarea de fuerza dinámica, como demuestra la elevada imprecisión del paciente cuan-

do intentaba seguir las modulaciones de la fuerza impuestas externamente. En consonancia con este hallazgo, ciertos estudios han observado actividad en la banda gamma durante la aplicación de estímulos eléctricos percibidos conscientemente en una mano, actividad que no se evidenció con los estímulos no percibidos [55]. Este hecho parece indicar que la CCM en la banda gamma desempeña un papel sustancial en las tareas de detección somatosensorial. Por su parte, Bauer et al [56] también describieron que la atención táctil espacial aumentaba y prolongaba la actividad de la banda gamma en la SM1. En consonancia con esto último, se podría argumentar que en la generación de la CCM en la banda gamma resulta imposible discernir entre la contribución de una mala ejecución y la ausencia de propiocepción. Los autores llegaron a la conclusión de que tales datos avalan la importancia primordial de los mecanismos aferentes (la información propioceptiva) en la génesis de la CCM en la banda gamma durante la generación y el control de las fuerzas dinámicas. En ausencia de retroalimentación aferente, la CCM en la banda beta puede operar en un modo motor eferente para mantener un *output* motor estable durante la fuerza estática y dinámica.

Conclusión y observaciones finales

La presente revisión está fundamentada en los principales resultados de los estudios seleccionados con los criterios de búsqueda descritos en el apartado de metodología. De acuerdo con nuestros hallazgos, cabe esperar que la modulación de la CCM en las bandas beta y gamma sea la responsable de la sincronización entre las motoneuronas superiores e inferiores que posibilita un óptimo control motor fino [67]. La CCM en la banda beta resultó especialmente importante a la hora de ejecutar tareas de control preciso de manera sostenida, que exigen mayor concentración y esfuerzo, hecho que refleja las frecuencias de descarga preferidas de las unidades motoras en una condición específica. Pese a ello, constatamos la influencia de varios factores en la CCM de la banda beta, en otras palabras, que la CCM en dicha banda estaba influida por diversos factores, como son la magnitud de la fuerza, los recursos de atención y la complejidad de la tarea. Por su parte, en lo que concierne a la CCM en la banda gamma, aparentemente su modulación demandaría una integración dinámica compleja y continua de varios mecanismos, como son mayores recursos de atención, mecanismos aferentes e información cognitiva, puesto que no se evidencia modulación al-

guna por la magnitud de la fuerza. Así pues, tales mecanismos serían necesarios presumiblemente para conseguir un funcionamiento correcto y eficaz de las redes neuronales cuando se requiere generar una fuerza dinámica.

De todo ello se desprende que la CCM en las bandas beta y gamma podría ampliar nuestros conocimientos acerca de la plasticidad cerebral del sistema motor, tanto de las personas sanas como de los pacientes neurológicos (por ejemplo, polineuropatías). Como observación y perspectiva final, los datos disponibles apuntan a que la modulación de la CCM en las bandas beta y gamma podría servir como un índice sensible para cuantificar los cambios dinámicos en el control motor fino durante las tareas de fuerza, y tiene posibilidades de convertirse en una herramienta válida para caracterizar los patrones de cambios en las actividades del SNC tanto en el campo de la investigación básica (aprendizaje y control motor y neuroplasticidad) como en el de los estudios médicos, especialmente en el ámbito de la restauración de la función motora, como, por ejemplo, después de un ictus.

Es preciso proseguir con las investigaciones para adquirir un conocimiento más profundo de la relación de la sincronización entre la actividad cortical y la fuerza muscular, con especial énfasis en la recuperación funcional y la activación hemisférica localizada. Así, por ejemplo, la reducción de la CCM parece revelar la existencia de una alteración en la comunicación entre los centros de control motor del cerebro y los músculos involucrados en la ejecución del movimiento deseado. Este acoplamiento anómalo podría ser el resultado de cambios corticales relacionados con la lesión o con cambios musculares acaecidos a raíz de la patología [56], aunque esta última posibilidad desempeñaría un papel menos significativo puesto que la causa del acoplamiento deficiente radicaría fundamentalmente en la alteración del flujo de información que circula entre el cerebro y el músculo [55]. Además, será preciso esclarecer en estudios futuros si la edad puede actuar como un factor modulador de la CCM, puesto que Patino et al [35] señalaron que los niveles de CCM manifestados por los individuos control (de edad avanzada) resultaron por lo general inferiores, tal y como habían observado con anterioridad Omlor et al [13] al investigar a personas jóvenes.

Bibliografía

- Machado S, Cunha M, Portella CE, Silva JG, Velasques B, Bastos VH, et al. Participación de la corteza parietooccipital en el proceso de integración sensoriomotora: estudio electroencefalográfico. *Rev Neurol* 2008; 47: 146-9.
- Machado D, Bastos VH, Cunha M, Velasques B, Machado S, Basile L, et al. Efectos del bromacepam en el desarrollo de una actividad sensoriomotora: un estudio electroencefalográfico. *Rev Neurol* 2009; 49: 295-9.
- Cunha M, Bastos VH, Machado D, Cagy M, Piedade RA, Ribeiro AP. Efecto del bromacepam sobre el aprendizaje motor: análisis electroencefalográfico a partir del ritmo beta. *Rev Neurol* 2006; 43: 507-10.
- Cheney PD, Fetz EE. Functional classes of primate corticomotoneuronal cells and their relation to active force. *J Neurophysiol* 1980; 44: 773-91.
- Evarts EV, Fromm C, Kroller J, Von Jennings A. Motor cortex control of finely graded forces. *J Neurophysiol* 1983; 49: 1199-215.
- Georgopoulos AP, Ashe J, Smyrnis N, Taira M. The motor cortex and the coding of force. *Science* 1992; 256: 1692-5.
- Smith AM, Hepp-Reymond MC, Wyss UR. Relation of activity in precentral cortical neurons to force and rate of force change during isometric contractions of finger muscles. *Exp Brain Res* 1975; 23: 315-32.
- Roelfsema PR, Engel AK, König P, Singer W. Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas. *Nature* 1997; 385: 157-61.
- Classen J, Gerloff C, Honda M, Hallett M. Integrative visuomotor behavior is associated with interregionally coherent oscillations in the human brain. *J Neurophysiol* 1998; 79: 1567-73.
- Fang Y, Daly JJ, Sun J, Hovorak K, Fredrickson E, Pundik S, et al. Functional corticomuscular connection during reaching is weakened following stroke. *Clin Neurophysiol* 2009; 120: 994-1002.
- Feige B, Aertsen A, Kristeva-Feige R. Dynamic synchronization between multiple cortical motor areas and muscle activity in phasic voluntary movements. *J Neurophysiol* 2000; 84: 2622-29.
- Mima T, Toma K, Koshy B, Hallett M. Coherence between cortical and muscular activities after subcortical stroke. *Stroke* 2001; 32: 2597-601.
- Omlor W, Patino L, Hepp-Reymond MC, Kristeva R. Gamma-range corticomuscular coherence during dynamic force output. *Neuroimage* 2007; 34: 1191-8.
- Witte M, Patino L, Andrykiewicz A, Hepp-Reymond MC, Kristeva R. Modulation of human corticomuscular beta-range coherence with low-level static forces. *Eur J Neurosci* 2007; 26: 3564-70.
- Kilner JM, Baker SN, Salenius S, Jousmäki V, Hari R, Lemon RN. Task-dependent modulation of 15-30 Hz coherence between rectified EMGs from human hand and forearm muscles. *J Physiol* 1999; 516: 559-70.
- Pfurtscheller G, Neuper C. Simultaneous EEG 10-Hz desynchronization and 40-Hz synchronization during finger movements. *Neuroreport* 1992; 3: 1057-60.
- Brown P, Salenius S, Rothwell JC, Hari R. Cortical correlate of the piper rhythm in humans. *J Neurophysiol* 1998; 80: 2911-7.
- Mima T, Simpkins N, Oluwatimilehin T, Hallett M. Force level modulates human cortical oscillatory activities. *Neurosci Lett* 1999; 275: 77-80.
- Kristeva-Feige R, Patino L, Omlor W. Beta-range cortical motor spectral power and corticomuscular coherence as a mechanism for effective corticospinal interaction during steady-state motor output. *Neuroimage* 2007; 36: 785-92.
- Halliday DM, Conway BA, Farmer SF, Rosenberg JR. Using electroencephalography to study functional coupling between cortical activity and electromyograms during voluntary contractions in humans. *Neurosci Lett* 1998; 241: 5-8.
- Mima T, Stegera J, Schulman AE, Gerloff C, Hallett M. Electroencephalographic measurement of motor cortex control of muscle activity in humans. *Clin Neurophysiol* 2000; 111: 326-37.
- Kristeva-Feige R, Fritsch C, Timmerb J, Lücking CH. Effects of attention and precision of exerted force on beta range EEG-EMG synchronization during a maintained motor contraction task. *Clin Neurophysiol* 2002; 113: 124-31.

23. Ashe J. Force and the motor cortex. *Behav Brain Res* 1997; 87: 255-69.
24. Conway BA, Halliday DM, Farmer SF, Shahani U, Maas P, Weir AI, et al. Synchronization between motor cortex and spinal motoneuronal pool during the performance of a maintained motor task in man. *J Physiol* 1995; 489: 917-24.
25. Baker SN, Olivier E, Lemon RN. Coherent oscillations in monkey motor cortex and hand muscle EMG show task dependent modulation. *J Physiol* 1997; 501: 225-41.
26. Gross J, Tass PA, Salenius S, Hari R, Freund HJ, Schnitzler A. Cortico-muscular synchronization during isometric muscle contraction in humans as revealed by magneto-encephalography. *J Physiol* 2000; 527: 623-31.
27. Baker SN, Kilner JM, Pinches EM, Lemon RN. The role of synchrony and oscillations in the motor output. *Exp Brain Res* 1999; 128: 109-17.
28. Kilner JM, Baker SN, Salenius S, Hari R, Lemon RN. Human cortical muscle coherence is directly related to specific motor parameters. *J Neurosci* 2000; 20: 8838-45.
29. Pohja M, Salenius S, Hari R. Cortico-muscular coupling in a human subject with mirror movements: a magneto-encephalographic study. *Neurosci Lett* 2002; 327: 185-8.
30. Fisher RJ, Galea MP, Brown P, Lemon RN. Digital nerve anaesthesia decreases EMG-EMG coherence in a human precision grip task. *Exp Brain Res* 2002; 145: 207-14.
31. Kilner JM, Fisher RJ, Lemon RN. Coupling of oscillatory activity between muscles is strikingly reduced in a deafferented subject compared with normal controls. *J Neurophysiol* 2004; 92: 790-6.
32. Riddle CN, Baker SN. Manipulation of peripheral neural feedback loops alters human corticomuscular coherence. *J Physiol* 2005; 566: 625-39.
33. Baker SN, Chiu M, Fetz EE. Afferent encoding of central oscillations in the monkey arm. *J Neurophysiol* 2006; 95: 3904-10.
34. Perez MA, Lundbye-Jensen J, Nielsen JB. Changes in corticospinal drive to spinal motoneurons following visuomotor skill learning in humans. *J Physiol* 2006; 573: 843-55.
35. Patino L, Omlor W, Chakarov V, Hepp-Reymond MC, Kristeva R. Absence of gamma-range corticomuscular coherence during dynamic force in a deafferented patient. *J Neurophysiol* 2008; 99: 1906-16.
36. Safri NM, Murayama N, Igasaki T, Hayashida Y. Effects of visual stimulation on cortico-spinal coherence during isometric hand contraction in humans. *Int J Psychophysiol* 2006; 61: 288-93.
37. Safri NM, Murayama N, Hayashida Y, Igasaki T. Effects of concurrent visual tasks on cortico-muscular synchronization in humans. *Brain Res* 2007; 1155: 81-92.
38. Andrykiewicz A, Patino L, Naranjo JR, Witte M, Hepp-Reymond MC, Kristeva R. Corticomuscular synchronization with small and large dynamic force output. *BMC Neurosci* 2007; 8: 1-12.
39. Chakarov V, Naranjo JR, Schulte-Mönting J, Omlor W, Huethe F, Kristeva R. Beta-range EEG-EMG coherence with isometric compensation for increasing modulated low-level forces. *J Neurophysiol* 2009; 102: 1115-20.
40. Feige B, Kristeva-Feige R, Rossi S, Pizzella V, Rossini PM. Neuromagnetic study of movement-related changes in rhythmic brain activity. *Brain Res* 1996; 734: 252-60.
41. Pfurtscheller G. Event-related synchronization (ERS): an electrophysiological correlate of cortical areas at rest. *Clin Neurophysiol* 1992; 83: 62-9.
42. Salenius S, Portin K, Kajola M, Salmelin R, Hari R. Cortical control of human motoneuron firing during isometric contraction. *J Neurophysiol* 1997; 77: 3401-5.
43. Brown P. Cortical drives to human muscle: the Piper and related rhythms. *Prog Neurobiol* 2000; 60: 97-108.
44. Schoffelen JM, Oostenveld R, Fries P. Neuronal coherence as a mechanism of effective corticospinal interaction. *Science* 2005; 308: 111-3.
45. Jefferys JGR, Traub RD, Whittington MA. Neuronal networks for induced '40 Hz' rhythms. *Trends Neurosci* 1996; 19: 202-8.
46. MacKay WA. Synchronized neuronal oscillations and their role in motor processes. *Trends Cogn Sci* 1997; 1: 176-83.
47. Salenius S, Hari R. Synchronous cortical oscillatory activity during motor action. *Curr Opin Neurobiol* 2003; 13: 678-84.
48. Milner-Brown HS, Stein RB, Yemm R. Changes in firing rate of human motor units during linearly changing voluntary contractions. *J Physiol* 1973; 230: 371-90.
49. Brovelli A, Ding M, Ledberg A, Chen Y, Nakamura R, Bressler SL. Beta oscillations in a large-scale sensorimotor cortical network: directional influences revealed by Granger causality. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2004; 101: 9849-54.
50. Kilner JM, Fisher RJ, Lemon RN. Coupling of oscillatory activity between muscles is strikingly reduced in a deafferented subject compared with normal controls. *J Neurophysiol* 2004; 92: 790-6.
51. Lalo E, Gilbertson T, Doyle L, Di Lazzaro V, Cioni B, Brown P. Phasic increases in cortical beta activity are associated with alterations in sensory processing in the human. *Exp Brain Res* 2006; 177: 137-45.
52. Fries P, Reynolds JH, Rorie AE, Desimone R. Modulation of oscillatory neuronal synchronization by selective visual attention. *Science* 2001; 291: 1560-63.
53. Brown P, Marsden CD. What do the basal ganglia do? *Lancet* 1998; 351: 1801-4.
54. Donoghue JP, Sanes JN, Hatsopoulos NG, Gaal G. Neural discharge and local field potential oscillations in primate motor cortex during voluntary movements. *J Neurophysiol* 1998; 79: 159-73.
55. Meador KJ, Ray PG, Echaz J, Loring DW, Vachtsevanos GJ. Gamma coherence and conscious perception. *Neurology* 2002; 59: 847-54.
56. Bauer M, Oostenveld R, Peeters M, Fries P. Tactile spatial attention enhances gamma-band activity in somatosensory cortex and reduces low-frequency activity in parieto-occipital areas. *J Neurosci* 2006; 26: 490-501.
57. Aoki F, Fetz EE, Shupe L, Lettich E. Increased gamma-range activity in human sensorimotor cortex during performance of visuomotor tasks. *Clin Neurophysiol* 1999; 110: 524-37.
58. Aoki F, Fetz EE, Shupe L, Lettich E, Ojemann GA. Changes in power and coherence of brain activity in human sensorimotor cortex during performance of visuomotor tasks. *Biosystems* 2001; 63: 89-99.
59. Tallon-Baudry C, Bertrand O. Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation. *Trends Cogn Sci* 1999; 3: 151-62.
60. Marsden JE, Werhahn KJ, Ashby P, Rothwell J, Noachtar S, Brown P. Organization of cortical activities related to movement in humans. *J Neurosci* 2000; 20: 2307-14.
61. Macefield VG, Hager-Ross C, Johansson RS. Control of grip force during restraint of an object held between finger and thumb: responses of cutaneous afferents from the digits. *Exp Brain Res* 1996; 108: 155-71.
62. Engel AK, Fries P, Singer W. Dynamic predictions: oscillations and synchrony in top-down processing. *Nat Rev Neurosci* 2001; 2: 704-16.
63. Gerloff C, Braun C, Staudt M, Hegner YL, Dichgans J, Krägeloh-Mann I. Coherent corticomuscular oscillations originate from primary motor cortex: evidence from patients with early brain lesions. *Hum Brain Mapp* 2006; 27: 789-98.
64. Mima T, Hallett M. Corticomuscular coherence: a review. *J Clin Neurophysiol* 1999; 16: 501-11.
65. Johansson RS, Birznieks I. First spikes in ensembles of human tactile afferents code complex spatial fingertip events. *Nat Neurosci* 2004; 7: 170-7.
66. Macefield VG, Johansson RS. Control of grip force during restraint of an object held between finger and thumb: responses of muscle and joint afferents from the digits. *Exp Brain Res* 1996; 108: 172-84.
67. Schnitzler A, Gross J. Normal and pathological oscillatory communication in the brain. *Nat Rev Neurosci* 2005; 6: 285-96.

Corticomuscular coherence behavior in fine motor control of force: a critical review

Introduction. Understanding how the human motor control operates is an important issue to the neuroscience. One example is how the motor cortex controls muscle activity, which can be observed through corticomuscular coherence (CMC).

Aim. Our study aimed to verify the influence of certain factors related to the fine motor control of force tasks on CMC. Our issue is if would be possible the strength of the coupling between the central and muscular systems measured by changes in oscillatory activity of beta- and gamma-band being influenced by these factors as much healthy subjects as patients.

Development. Beta-band CMC was especially important when executing sustaining accurate control tasks, which need more concentration and effort. However, we found that beta-band CMC was influenced by some factors. With regard to gamma-band CMC, apparently a complex and continuous dynamic integration of several mechanisms would be necessary to modulate gamma-band CMC, since it was not modulated by magnitude of force. Therefore, it seems these mechanisms would be required to an adequate and effective neural networks operation when a dynamic force output is required.

Conclusion. Beta- and gamma-band CMC could enrich our understanding of the dynamic changes of the motor system not only in health subjects but also in neurological patients. It may serve as a sensitive index for quantifying dynamical changes in fine motor control of force. It has the potential to become a useful tool to characterize the patterns of changes in central nervous system's activities for the purposes of basic research, especially in restoring of motor function.

Key words. Beta-band. Corticomuscular coherence. Fine motor control. Force. Gamma-band. Sensorimotor integration.