

Congreso de Educación Física y Ciencias

14º Argentino, 9º Latinoamericano, 1º Internacional

18 al 23 de octubre y del 1 al 4 de diciembre 2021

Cuantificación del control motor a través de biomarcadores electrofisiológicos

Una propuesta para la valoración objetiva de la producción motora

Autorías y filiaciones

Cano, Leonardo A. ^{1, 3, 4}

lcano@herrera.unt.edu.ar

Pizá, Alvaro G. ^{2, 3, 4}

gpiza@herrera.unt.edu.ar

Farfán, Fernando D. ^{2, 3, 4}

ffarfan@herrera.unt.edu.ar

(1) Cátedra de Anatomía, Facultad de Educación Física, FacDEF. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina.

(2) Departamento de Bioingeniería, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, FACET. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina.

(3) Instituto Superior de Investigaciones Biológicas, INSIBIO. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET. Argentina.

(4) Laboratorio de Investigación en Neurociencias y Tecnologías Aplicadas, LINTEC. Tucumán, Argentina.

Resumen

Se puede estudiar la comunicación del sistema nervioso y las estrategias de control motor a través de la actividad eléctrica en el cerebro y en los músculos. La producción motora (PM) ha sido caracterizada a partir de biomarcadores electrofisiológicos, tales como los índices de coherencia corticomuscular (CMC) e intermuscular (IMC). En esta revisión hemos realizado un recorrido por la literatura relacionada a la PM, desde las bases electrofisiológicas hacia una propuesta del cálculo de CMC e IMC.

Palabras clave: Biomarcadores, electroencefalografía, electromiografía, deportes, control motor

Introducción

Han sido muchas las disciplinas a partir de las cuales se ha intentado estudiar el comportamiento motor humano, brindando perspectivas de la biomecánica, fisiología, psicología, neurocognitivas, entre otras. En todos estos abordajes es posible encontrar un factor común, *'los procesos internos del sujeto'*, y cada uno de los campos disciplinares se ha enfocado en las variables que puede explicar según sus propios criterios.

La teoría del aprendizaje motor basado en el procesamiento de la información de Marteniuk (1976) plantea que el sujeto recibe estímulos del ambiente en el que se encuentra, realiza una percepción valorando sus posibilidades de interactuar con ese entorno, toma decisiones en función de sus conocimientos previos, planifica y ejecuta una respuesta motora, la cual es evaluada instantáneamente desencadenando una nueva cascada del mismo proceso (**Figura 1**). Este bucle es el mecanismo simplificado de aprendizaje motor a través de la interacción con el medio externo, y el sistema nervioso central (SNC) es el encargado de procesar y administrar toda la información que el sujeto requiere para su desarrollo.

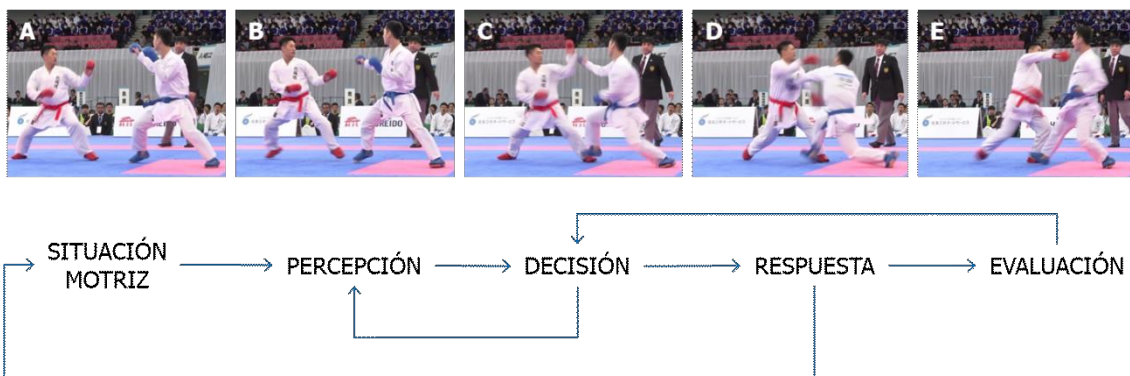


Figura 1: Bucle de aprendizaje motor basado en la interacción con el medio adaptado de Marteniuk (1976). (A) El karateca con cinturón azul se encuentra en una situación motriz que es una combinación única de las condiciones de todo el entorno: el marcador, la temperatura ambiente, el público, etc. (B) Percibe un movimiento del oponente, mide las condiciones de espacio y tiempo. (C) Analiza las posibilidades de efectividad y programa el gesto motor. (D) Ejecuta el movimiento regulando los detalles que permiten asemejar la planificación previa con la ejecución motora posterior. Esta ejecución lo coloca en una nueva situación motriz única e irrepetible. (E) Evalúa el resultado del procedimiento del ciclo percepción-decisión-respuesta, el cual tendrá incidencia en los próximos bucles generando un aprendizaje a través de la iteración. Fuente: Elaboración propia.

La organización del SNC históricamente se ha estudiado de forma compartimental y jerárquica, dividiéndolo en estructuras especializadas para funciones específicas permitiendo

dar respuestas adaptativas al requerimiento constante del organismo. Al mismo tiempo, tiene interconexiones que permiten dar respuestas en situaciones que superan los requerimientos habituales. De esta forma, encontramos una estructura especializada conocida como corteza cerebral, la cual ha sido objeto de estudio en algunos procesos del comportamiento motor. Esta estructura tiene funciones especiales dispuestas en diferentes regiones anatómicas que se han aparejado con funciones específicas del organismo conocidas como áreas de Brodmann. Dos de las áreas más estudiadas de la corteza son la somatosensorial primaria (S1) y la motora primaria (M1), la integración de estas áreas con otras estructuras del SNC es de fundamental importancia para estudiar la producción de respuestas motoras. En las prácticas deportivas se entrelazan diferentes aristas del sujeto cuando enfrenta una situación motriz, se mezcla la información somatosensorial, se toman decisiones a partir de las competencias motrices, la memoria, los estados emocionales, hasta que finalmente se programa y ejecuta una respuesta. Estos componentes del gesto motor tienen diferentes incidencias en el rendimiento, modificando el aspecto más observable: la eficiencia motora. El objetivo de la presente revisión bibliográfica ha sido establecer cuáles son los biomarcadores electrofisiológicos corticales y musculares disponibles en bibliografía, que podrían ser representativos para el estudio, investigación y cuantificación de la eficiencia motora.

El Monitoreo de Señales Corticales

La electroencefalografía (EEG) es una técnica no-invasiva la cual permite monitorear la actividad eléctrica del cerebro. Numerosos autores han reportado ciertas desventajas, inconvenientes y limitaciones de esta técnica de monitoreo (Cheron *et al.*, 2016). Sin embargo, hoy en día sigue siendo insuperable en cuanto a la capacidad de resolución temporal de la información cortical obtenida, y en características de portabilidad, no-invasividad y bajo costo (Cohen, 2011).

Los análisis de las señales de EEG se basan en la determinación de sus características frecuenciales (espectro en frecuencia) y esto es debido a su forma oscilatoria. Desde el punto de vista estadístico las señales de EEG son consideradas series de tiempo no estacionarias cuyo contenido espectral se encuentra en el rango de 0,5 a 135 Hz. Singer (1993) mostró que la frecuencia de oscilación y la cantidad de neuronas involucradas en tal activación podrían presentar una relación inversamente proporcional. Es interesante interpretar esta dinámica cerebral como la necesidad del organismo de especializar redes neuronales y comandarlas a

través de un patrón rítmico, es decir, funciones más específicas para redes más pequeñas. Existe un consenso propuesto por la Federación Internacional de Neurofisiología Clínica para el estudio de las diferentes bandas de frecuencias clasificadas en función de un rango aproximado y conocidas como ondas cerebrales (**Figura 2**).

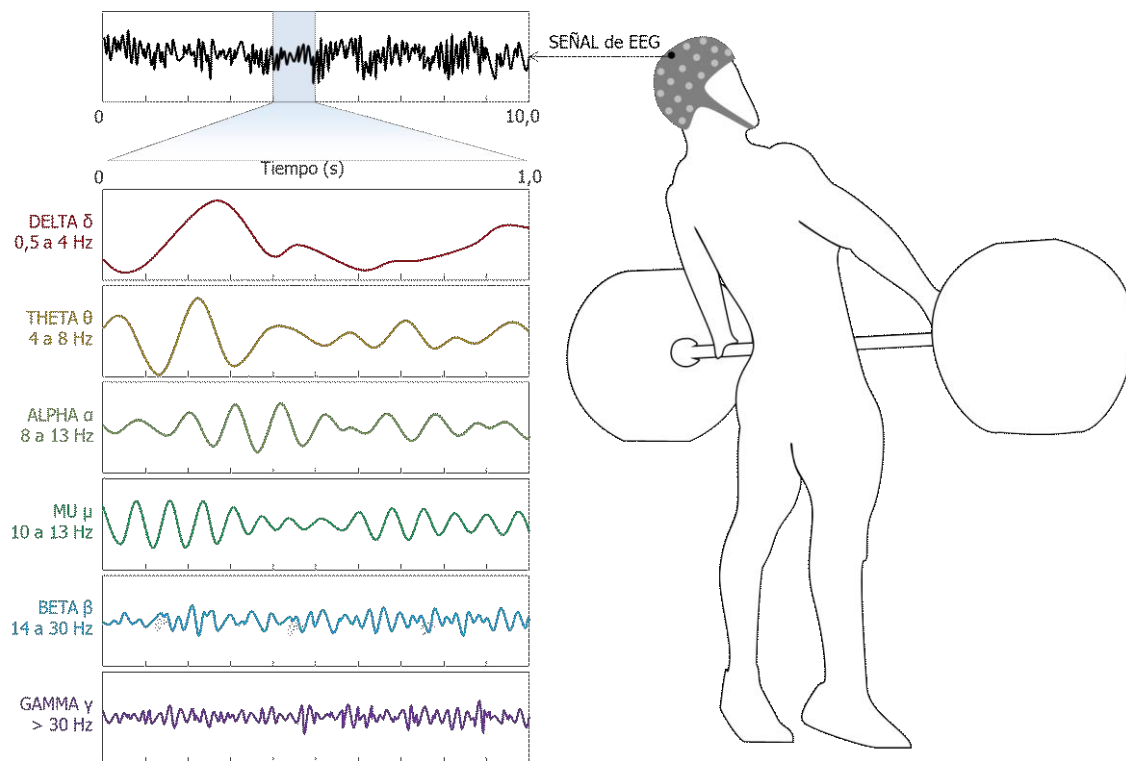


Figura 2: Clasificación de las ondas cerebrales. La descomposición del espectro de frecuencia de un segmento de la señal de EEG captada por un electrodo en el cuero cabelludo de una persona se clasifica en función de rangos aproximados de oscilación y se denominan con letras del alfabeto griego. La figura es un ejemplo con fines didácticos, no representa una señal real. Fuente: Elaboración propia.

Producción Motora y Circuitos de Integración Corticomuscular

El estudio de la producción motora es uno de los desafíos más interesantes de las neurociencias, y para este cometido la EEG proporciona información de alta densidad y gran resolución temporal. El aumento o disminución de la conectividad entre regiones, dado por la sincronización o desincronización en una determinada banda de frecuencia, parece establecer un patrón de excitación/inhibición en las redes neuronales involucradas, determinando redes espacio-temporales de activación cerebral (conectividad funcional).

La producción motora depende de la integración de diferentes regiones del SNC, tales como la corteza, el cerebelo, estructuras diencefálicas e incluso la médula espinal. Esta integración está mediada por un sistema complejo de comunicación neural a través de un cierto orden jerárquico en los ritmos oscilatorios. La resultante de esas interacciones se traduce en la excitación de las neuronas piramidales (PNs) en áreas motoras. Existe evidencia de que las oscilaciones en la corteza observadas en el EEG tienen relación con las oscilaciones en la médula espinal (van Wijk et al., 2012), lo cual demuestra una comunicación con patrones más precisos por vía corticoespinal, que a su vez determinan la activación muscular a través de las motoneuronas.

La comunicación entre M1 y el músculo es un tópico que lleva relativamente poco tiempo bajo estudio (Baker et al., 1997; Conway et al., 1995) y hay muchas controversias en la interpretación de las señales de EEG y EMG (Farina *et al.*, 2004, 2014). La coherencia corticomuscular (CMC) es un índice utilizado para establecer conectividad entre regiones de la corteza y la activación muscular a través de la correlación en el espectro de frecuencia de ambas señales (Fang *et al.*, 2009).

Las observaciones actuales sustentan la hipótesis de la existencia de una diferenciación entre las estrategias de producción de fuerza estática (con la CMC en la banda beta) y la producción de fuerza dinámica (CMC en gamma) (Gwin & Ferris, 2012; Reyes et al., 2017). Esta diferenciación funcional parece tener relación con las características del reclutamiento y frecuencia de disparo de las unidades motoras en función de la tarea (Conwit *et al.*, 1999; van Wijk *et al.*, 2012). Existen aspectos funcionales que fortalecen los postulados de la CMC como parámetro de eficiencia en la producción motora basados en modulación de la conectividad en función de los requerimientos de fuerza, la edad y patologías neuromusculares (Liu *et al.*, 2019).

Los mecanismos que subyacen a la organización de la coordinación muscular están intervenidos por señales corticales, pero también por interconexiones neuromusculares a nivel medular (por ejemplo, inhibiciones reflejas). Este nivel de comunicación es estudiado a través de un índice de coherencia intermuscular (IMC), el cual ha tomado gran relevancia en los últimos años, y permite explicar los mecanismos de coactivación y sinergia en redes musculares (Boonstra *et al.*, 2016).

Por todo lo expuesto es posible postular que existen sinergias musculares en la producción motora. Por un lado, para estabilizar articulaciones que se darían a través de contracciones musculares tónicas por medio de estimulación neural en la banda beta. Y, por otro lado,

contracciones musculares fásicas constituidas por redes musculares agonistas/antagonistas comunicadas a través de la onda gamma con un amplio rango de oscilaciones de alta frecuencia lo que permitiría modular la expresión de fuerza.

Discusión

Basado en la evidencia presentada sobre los biomarcadores electrofisiológicos utilizados para valorar la producción motora (Baker et al., 1997; Conway et al., 1995; Liu et al., 2019; Reyes et al., 2017), proponemos que la CMC en la banda beta explica las sinergias de estabilidad, y la CMC en la banda gamma explica las sinergias de movilidad. En este sentido, es posible suponer que una mayor CMC en beta explicaría un mayor esfuerzo del SNC para lograr establecer la estabilidad de segmentos necesarios para brindar solidez biomecánica a las estructuras involucradas, el cual es un aspecto primordial que precederá a una ejecución eficaz. Este mayor compromiso del SNC podrá ser inversamente proporcional a la eficiencia del sistema, en el sentido de que una mayor IMC con origen neural común podría pensarse como una estrategia de coordinación con mayor grado de automatización y eficiencia. De igual manera, una mayor CMC en gamma podría explicar la injerencia de M1 en la actividad muscular, de tal forma que mientras mayor es el valor de conectividad, mayor es el esfuerzo del SNC, siempre que la tarea motriz haya sido cumplida.

Conclusión

En esta revisión hemos analizado la participación de las diferentes ondas cerebrales en la producción motora y su expresión en la actividad muscular. Entendemos que existe evidencia suficiente para considerar el potencial científico del cálculo de CMC e IMC en las bandas beta y gamma (y sus interacciones) para el desarrollo de biomarcadores electrofisiológicos que permitirán establecer parámetros cuantitativos de la eficiencia motora.

Referencias

- Baker, S. N., Olivier, E., & Lemon, R. N. (1997). Coherent oscillations in monkey motor cortex and hand muscle EMG show task-dependent modulation. *The Journal of Physiology*, 501(1), 225-241. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1997.225bo.x>
- Boonstra, T. W., Danna-Dos-Santos, A., Xie, H.-B., Roerdink, M., Stins, J. F., & Breakspear, M. (2016). Muscle networks: Connectivity analysis of EMG activity during postural control. *Scientific Reports*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/srep17830>

- Cheron, G., Petit, G., Cheron, J., Leroy, A., Cebolla, A., Cevallos, C., Petieau, M., Hoellinger, T., Zarka, D., Clarinval, A.-M., & Dan, B. (2016). Brain Oscillations in Sport: Toward EEG Biomarkers of Performance. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00246>
- Cohen, M. X. (2011). It's about Time. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00002>
- Conway, B. A., Halliday, D. M., Farmer, S. F., Shahani, U., Maas, P., Weir, A. I., & Rosenberg, J. R. (1995). Synchronization between motor cortex and spinal motoneuronal pool during the performance of a maintained motor task in man. *The Journal of Physiology*, 489(3), 917-924. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1995.sp021104>
- Conwit, R. A., Stashuk, D., Tracy, B., McHugh, M., Brown, W. F., & Metter, E. J. (1999). The relationship of motor unit size, firing rate and force. *Clinical Neurophysiology*, 110(7), 1270-1275. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(99\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00054-1)
- Fang, Y., Daly, J. J., Sun, J., Hovorat, K., Fredrickson, E., Pundik, S., Sahgal, V., & Yue, G. H. (2009). Functional corticomuscular connection during reaching is weakened following stroke. *Clinical Neurophysiology*, 120(5), 994-1002. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.02.173>
- Farina, D., Merletti, R., & Enoka, R. M. (2004). The extraction of neural strategies from the surface EMG. *Journal of Applied Physiology*, 96(4), 1486-1495. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01070.2003>
- Farina, D., Merletti, R., & Enoka, R. M. (2014). The extraction of neural strategies from the surface EMG: An update. *Journal of Applied Physiology*, 117(11), 1215-1230. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00162.2014>
- Gwin, J. T., & Ferris, D. P. (2012). Beta- and gamma-range human lower limb corticomuscular coherence. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00258>
- Liu, J., Sheng, Y., & Liu, H. (2019). Corticomuscular Coherence and Its Applications: A Review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00100>
- Marteniuk, R. G. (1976). *Information processing in motor skills*. Holt, Rinehart and Winston.
- Reyes, A., Laine, C. M., Kutch, J. J., & Valero-Cuevas, F. J. (2017). Beta Band Corticomuscular Drive Reflects Muscle Coordination Strategies. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fncom.2017.00017>

- Singer, W. (1993). Synchronization of Cortical Activity and its Putative Role in Information Processing and Learning. *Annual Review of Physiology*, 55(1), 349-374. <https://doi.org/10.1146/annurev.ph.55.030193.002025>
- van Wijk, B. C. M., Beek, P. J., & Daffertshofer, A. (2012). Neural synchrony within the motor system: What have we learned so far? *Frontiers in Human Neuroscience*, 6. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00252>