

NEUROERGONOMÍA

Interfaces cerebro-computadora aplicadas a la rehabilitación motora en accidente cerebrovascular

Anabela Cantiani

Unidad Didáctica de Neuroergonomía
Máster en Neurociencia Cognitiva y del Comportamiento
Universidad de Granada

RESUMEN

El accidente cerebrovascular constituye una de las principales causas de discapacidad a nivel mundial, cuyo número crece sustancialmente cada año. Si bien en muchos casos la recuperación es exitosa, para el 40% de los pacientes las pérdidas funcionales no logran restituirse y requieren asistencia en su vida cotidiana. Estudios recientes mostraron que la recuperación es posible incluso en los casos crónicos graves. Sin embargo, los abordajes tradicionales de rehabilitación motora requieren cierto nivel de capacidad residual.

El desarrollo de interfaces cerebro-computadora (*Brain Computer Interface*, BCI), que traducen la actividad cerebral en señales de control de computadoras o dispositivos externos, ofrecen nuevas posibilidades de intervención en la rehabilitación motora. Por un lado, las BCI permiten el control cerebral continuo de dispositivos para ayudar en las actividades de la vida diaria (BCI asistencial). También las BCI podrían facilitar la neuroplasticidad, favoreciendo el aprendizaje y la recuperación motora (BCI de rehabilitación). El desarrollo de sistemas de BCI no invasivos podría ofrecer intervenciones más eficaces y personalizadas en la neurorrehabilitación del accidente cerebrovascular.

Palabras clave: accidente cerebrovascular, ACV, neurorrehabilitación, interfaz cerebro-computadora, BCI

Índice

1. Introducción.....	1
2. ¿Qué son las interfaces cerebro-computadora?.....	4
3. Neuroplasticidad y aprendizaje.....	7
4. BCI en rehabilitación motora de accidente cerebrovascular.....	8
4.1. BCI e imaginería motora	
4.2. BCI, imaginería motora y realidad virtual	
4.3. BCI, imaginería motora y realidad virtual para el movimiento	
4.3.1. Estimulación eléctrica funcional	
4.3.2. Ortesis	
5. Conclusiones.....	14
6. Preguntas de estudio.....	15
Referencias.....	15

*“Medicine has not been able to cure me,
so I rely on technology to help me communicate and live”
Stephen Hawking*

1. Introducción

Como señala Hawking (2014) el desarrollo tecnológico tiene un gran impacto en el campo de la salud y ha contribuido sustancialmente a los procesos clínicos de diagnóstico y tratamiento; también al brindar estrategias alternativas cuando la medicina aún no logra responder a ciertas problemáticas.

El accidente cerebrovascular, que resulta del cese del flujo sanguíneo a la corteza como resultado de la coagulación —accidente cerebrovascular isquémico— o del sangrado —accidente cerebrovascular hemorrágico— constituye la segunda causa de muerte en el mundo, así como una de las

principales causas de discapacidad. Ello es especialmente sensible en la población activa que debe interrumpir sus actividades ocupacionales por las secuelas permanentes a nivel motor y/o cognitivo. Se prevé que la incidencia de accidentes cerebrovasculares aumentará anualmente, lo cual supone una problemática relevante para la salud pública mundial. En este sentido, el desarrollo tecnológico dirigido al tratamiento de estas patologías constituye una estrategia sanitaria de primera necesidad. No sólo para mejorar la funcionalidad de los pacientes, sino los niveles de autonomía y de calidad de vida concomitantes.

Se estima que el 50% de los sobrevivientes de un ictus padecen déficits motores o cognitivos duraderos (Remsik et al., 2016; Cervera et al., 2018; Van Dokkum et al., 2015). Dentro de las alteraciones motoras, se registra que en alrededor del 80% de los casos persisten déficits en el control fino de las extremidades superiores, y que más de la mitad de los sobrevivientes de ictus experimentan algún nivel de hemiparesia o hemiplejía permanente. Este tipo de secuelas se abordan primordialmente en el marco de las disciplinas terapéuticas físicas –fisioterapia, kinesiología, terapia ocupacional-. No obstante, alrededor del 20-30% de los sobrevivientes de accidentes cerebrovasculares no califican para muchas de las estrategias de rehabilitación por dolor, espasticidad, fatiga o bajo rango de movimientos (Cervera et al., 2018). Por ello, resulta imperativo que se desarrollen metodologías de rehabilitación y tratamientos eficaces para abordar cada etapa de la recuperación tras el advenimiento de un ictus: aguda, subaguda y crónica. A la vez que puedan adaptarse al nivel de deterioro: leve, moderado y severo. Se contempla el uso de la interfaz cerebro-computadora (BCI por sus siglas en inglés) como una herramienta prometedora para la rehabilitación motora después de un accidente cerebrovascular por ofrecer intervenciones más personalizadas —según fase, lesión y diferencias individuales—.

Este capítulo pretende introducir al lector en la aplicación de interfaces cerebro-computadora a la neurorrehabilitación de alteraciones en extremidades superiores tras un accidente cerebrovascular. Para ello, se define qué es una

interfaz cerebro-computadora. Luego se describe el uso de las BCI en el contexto de rehabilitación motora de pacientes que han padecido un accidente cerebrovascular. Finalmente, se detalla el uso de las BCI en función de distintas modalidades de retroalimentación.

2. ¿Qué son las interfaces cerebro-computadora?

Las interfaces cerebro-computadora (BCI) pueden definirse como «un sistema que mide la actividad del sistema nervioso central (SNC) y la convierte en una salida artificial que reemplaza, restaura, mejora, informa o mejora la salida natural del SNC y, por lo tanto, cambia las interacciones en curso entre el SNC y su entorno externo o interno» (Wolpaw & Wolpaw, 2012 citado en Daly & Huggins, 2015). ¿Qué quiere decir esto? Que se crea un puente directo entre el cerebro humano y un sistema externo, el cual detecta determinados patrones en la actividad cerebral y los puede traducir en comandos para controlar un dispositivo externo: computadoras, sillas de rueda, robots, entre otros (Tabernig et al., 2017).

Pero ¿cómo se comanda un dispositivo externo solo con la *mente*? Si bien los sistemas BCI poseen una estructura y modelo similar, utilizan diversas técnicas para reconocer y traducir las actividades mentales. El esquema general incluye:

1. Sistema de adquisición de señales cerebrales
2. Sistema de procesamiento
3. Dispositivo / control de retroalimentación

Se puede optar por distintos sistemas de adquisición de señales cerebrales. La selección depende principalmente de la facilidad de uso, la resolución de estados y del costo del dispositivo. Asimismo, se contempla si son de carácter invasivo o no invasivo. Las técnicas invasivas requieren la implantación de electrodos a través de una intervención quirúrgica. Las técnicas no invasivas no conllevan cirugía, y su registro es superficial. Dentro

de estas últimas se encuentran la magnetoencefalografía (MEG), electroencefalografía (EEG), la imagen por resonancia magnética funcional (fMRI) y la espectroscopia funcional de infrarrojo cercano (fNIRS).

La tecnología de adquisición de señal más común en BCI es la electroencefalografía no invasiva (EEG). Se utiliza más comúnmente porque es menos costosa, es portátil y presenta una alta resolución temporal que es adecuado para la aplicación en tiempo real (Shih et al., 2012 en Dinàres-Ferran et al., 2018). La electroencefalografía conlleva la aplicación de electrodos en la superficie de la cabeza del sujeto para registrar señales de la corteza cerebral. Estas señales se pueden asociar a determinadas tareas mentales. Una vez detectada y analizada la señal, el sistema BCI es capaz de decodificar los patrones de la señal para traducirlos en comandos de control.

A continuación, en la Figura 1, se observa un diagrama genérico que representa un sistema BCI basado en EEG. La BCI obtiene los datos del EEG del sujeto, los procesa y genera las señales adecuadas para controlar el dispositivo externo y brindar retroalimentación al sujeto (Dinàres-Ferran et al., 2018). Para profundizar en el funcionamiento de las BCI recomendamos al lector consultar el capítulo dedicado a la temática en Correa (2018).

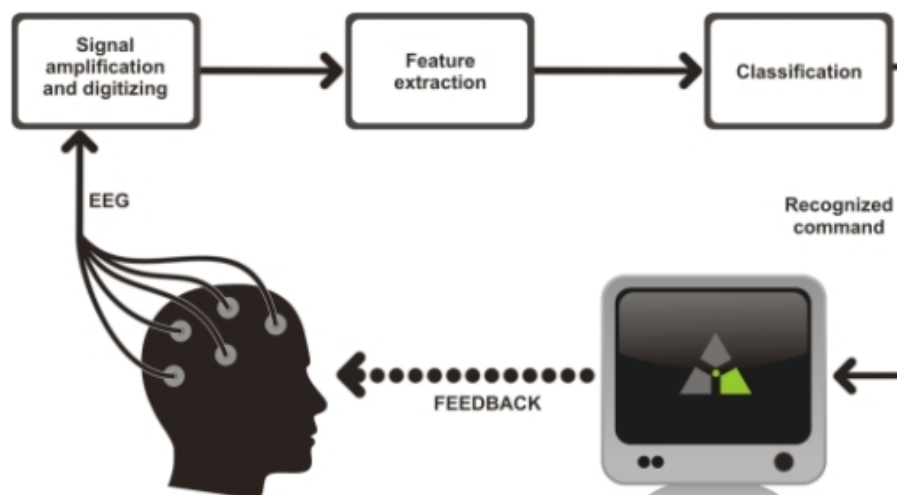


Figura 1. Esquema genérico de BCI a través de EEG (recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3112189_pone.0020674.g001.png)

Los sistemas basados en interfaces cerebro-computadora se desarrollaron inicialmente como una tecnología de asistencia dirigida a

personas con parálisis severa o con síndrome de cautiverio, fundamentalmente para favorecer la comunicación. En la actualidad, se investiga el aporte que pueden proporcionar en pacientes con secuelas de accidente cerebrovascular (Tabernig et al., 2017).

En el ámbito de la neurorrehabilitación, las BCI se pueden clasificar en función de dos estrategias diferentes:

- BCI de asistencia o auxiliar: Esta estrategia pretende sustituir una función motora perdida. Las señales cerebrales generadas por el paciente son procesadas directamente por la BCI, y se eluden las vías corticoespinales no funcionales para controlar un dispositivo externo. Por ejemplo, controlar una silla de ruedas para sustituir la marcha.
- BCI de rehabilitación o restauración: En este caso se pretende recuperar la función comprometida mediante el entrenamiento motor. Las señales cerebrales propiciadas por el usuario se procesan mediante la BCI para favorecer la reorganización neuronal. Por ejemplo, monitorear la activación neural en un ejercicio de imaginación motora para entrenar la flexión de la mano, brindando como feedback el movimiento efectuado a través de un avatar y el rango porcentual de logro en el monitor.

Las BCI de asistencia comenzaron a desarrollarse hace más de dos décadas para que las personas que padecen severas limitaciones motoras puedan controlar neuroprótesis, sillas de ruedas y diversos dispositivos eléctricos. En especial, se han hecho grandes contribuciones en el desarrollo de BCI que permiten la comunicación como sintetizadores de voz, procesadores de texto y aplicaciones de correo electrónico para pacientes con Esclerosis Lateral Amiotrófica (Lazarou et al., 2018). Esta intervención resulta conveniente en casos degenerativos o irreversibles cuando se debe sustituir una función por no ser posible su recuperación.

La estrategia concerniente a la rehabilitación, es más reciente en su estudio, y surge por la evidencia de la capacidad de adaptación y del aprendizaje del sistema nervioso para promover la reorganización funcional

luego de un accidente cerebrovascular (ACV), en especial, a partir de los casos en que los pacientes que no cuentan con remanente funcional suficiente para beneficiarse de las terapias físicas tradicionales. Esto es que cuando se produce la pérdida de una función motora, a través de las BCI el propósito reside en promover el reclutamiento de áreas del cerebro que se pretenden restaurar y facilitar la plasticidad neuronal (Dinàres-Ferran et al., 2018; Van Dokkum et al., 2015).

A continuación se describen los mecanismos que posibilitan la rehabilitación de las funciones alteradas tras un accidente cerebro-vascular.

3. Neuroplasticidad y aprendizaje

La neuroplasticidad es una propiedad intrínseca de las neuronas, por ende, refiere a la capacidad del sistema nervioso para reorganizar su estructura, función y/o conexiones a lo largo del desarrollo humano, así como tras una lesión neurológica. Asimismo, se evidencia que el proceso de neuroplasticidad es inherente al aprendizaje y susceptible a las condiciones ambientales. En relación a la neurorrehabilitación –entendido como proceso de reaprendizaje– se ha demostrado que la neuroplasticidad es sensible al tipo de tarea, a la frecuencia y duración del entrenamiento, así como también a la motivación y a la modalidad de retroalimentación (Van Dokkum et al., 2015).

Los principios *hebbianos* son cruciales para la rehabilitación motora, ya que constituyen un mecanismo básico de plasticidad neuronal que facilita el aprendizaje. El proceso consiste en que la activación coincidente y repetida de las neuronas presinápticas y postsinápticas refuerza la fuerza sináptica. Es decir, que se produce el reentrenamiento o reaprendizaje mediante la recreación de conexiones sinápticas necesarias para la actividad cortical funcional. Un ejemplo para ilustrar el supuesto teórico de las BCI sería que tras una lesión que interrumpe la conexión subcortical entre los músculos periféricos y la corteza sensoriomotora, la activación persistente entre la corteza motora primaria y el bucle sensorial se favorece la recuperación de las

conexiones residuales o el reclutamiento de nuevas vías latentes. En este caso se utiliza la BCI para detectar la intención de movimiento en la corteza motora primaria y efectuar feedback háptico adecuado para propiciar el cierre del bucle sensoriomotor. (Grosse-Wentrup et al., 2011; Van Dokkum et al. 2015).

Además, las terapias que incluyen observación del movimiento o feedback visual —i.e. realidad virtual— se basan en el sistema de neuronas espejo. Las investigaciones sobre el sistema de neuronas espejo han evidenciado que la observación de la acción, la imaginería motora y la imitación comparten el mismo circuito motor básico —parietal, premotor y motor primario— que la ejecución de la acción y, por lo tanto, proporcionan una fuente adicional o alternativa de entrenamiento motor para la recuperación (Kim et al., 2015; Remsik et al., 2017).

El lector interesado en profundizar sobre la relación entre el aprendizaje motor y la recuperación después de ACV puede remitirse al trabajo de Krakauer (2006).

4. BCI y rehabilitación motora de accidente cerebrovascular

En relación con el rol que cumplen las interfaces cerebro-computadora en el marco de la neurorrehabilitación, Van Dokkum et al. (2015) enumera alguna de las funciones más relevantes:

(a) Objetivar y fortalecer el entrenamiento al proporcionar información al paciente sobre la calidad de la ejecución a través de distintas modalidades de retroalimentación;

(b) ejecutar una tarea motora mediante estimulación eléctrica funcional u ortesis robóticas de rehabilitación que se aplican en la extremidad del paciente; a su vez permite cerrar el bucle sensoriomotor interrumpido a través de información propioceptiva y háptica;

(c) comprender las reorganizaciones cerebrales después de la lesión, para incidir o cuantificar los cambios inducidos por la plasticidad en las redes neurales.

En síntesis, el objetivo común de los sistemas BCI después de la lesión cerebral es restaurar la función motora perdida ayudando al paciente a aprender a producir actividad cerebral normal, o bien, modular la actividad cerebral para operar dispositivos de entrenamiento. Al hacerlo, las BCI integran un enfoque ascendente —al inducir cambios a nivel neural actuando en la periferia del cuerpo—, así como con enfoques descendentes —se interviene a nivel neural para generar cambios en el comportamiento periférico— (Van Dokkum et al., 2015).

A continuación se describen algunas aplicaciones de los sistemas BCI para la rehabilitación motora de pacientes que presentan alteraciones en las extremidades superiores como consecuencia de un accidente cerebrovascular: retroalimentación neurobiológica en tiempo real durante la imaginación motora; representación de la acción realizada en realidad virtual, y activación de dispositivos externos que inducen el movimiento real por medio de ortesis o por estimulación eléctrica funcional (FES).

4.1. BCI e imaginación motora

La imaginación motora (IM) consiste en la evocación por parte del paciente de un movimiento o gesto para aprender o mejorar su ejecución. Utilizada tradicionalmente en el ámbito deportivo para mejorar el rendimiento, en la actualidad este tipo de práctica se está convirtiendo en una de las principales estrategias terapéuticas para el tratamiento de alteraciones motoras a consecuencia de lesiones cerebrales o enfermedades neurológicas (Fernández-Gómez & Sánchez-Cabeza, 2018).

El entrenamiento BCI-IM es uno de los paradigmas de rehabilitación motora más utilizados, ya que conduce a la activación de áreas cerebrales involucradas en la ejecución real. En un paradigma BCI-IM se le indica al usuario que imagine movimientos específicos, por ejemplo, de la mano

izquierda o derecha. La imaginación de este movimiento activa áreas de la corteza, como ocurre con el movimiento real. Además, las BCI-IM proporcionan distintos tipos de retroalimentación al usuario según su desempeño en la tarea. Esta retroalimentación puede ser visual, auditiva o háptica a través de pantallas, auriculares o dispositivos con información propioceptiva. Los tipos de retroalimentación más simples consisten en una respuesta de «sí» o «no», o el movimiento horizontal de un cursor en el monitor de una computadora (Van Dokkum et al., 2015). En la Figura 2 se ofrece un ejemplo de retroalimentación visual:



Figura 2. Feedback visual con avatar tridimensional en primera persona (Voggeneder, 2016). <https://www.flickr.com/photos/arselectronica/42807727324>

Dentro de las ventajas que ofrecen los sistemas BCI en la neurorrehabilitación podemos mencionar que permite a los terapeutas monitorear:

(1) Tareas de Imaginería Motora con mayor precisión. Ya que la implementación de la BCI presenta retroalimentación en tiempo real y brinda información sobre el nivel de desempeño de modo más ostensible (Remsik et al., 2016; Sabathiel et al., 2016 en Van Dokkum et al., 2015).

(2) El nivel global de atención. Se trata de un aspecto importante en el aprendizaje motor ya que es sensible al nivel de carga mental. Mandrick et al. (2013) han evidenciado que la actividad medida por fNIRS sobre la corteza prefrontal puede discriminar entre niveles de carga mental bajos y moderados. En ese estudio, los participantes realizaban una tarea motora de agarre (al 15% y 30% de la contracción voluntaria máxima) en acompañamiento o no de una tarea mental (aritmética). Se observó que la actividad de la corteza prefrontal medida por fNIRS aumentó significativamente de acuerdo al esfuerzo motor, y a las condiciones de doble tarea, mientras que empeoraba el desempeño de la tarea mental. Asimismo, se ha demostrado que fNIRS es sensible a la disminución de la atención. Estos resultados sugieren que puede resultar conveniente medir los cambios en la atención durante el entrenamiento de BCI, para evitar la sobrecarga mental y para asegurar una mejor atención focalizada hacia la actividad propuesta.

(3) El nivel de equilibrio inter-hemisférico. Al respecto se ha descrito que después de un accidente cerebrovascular, se observa un marcado desequilibrio de la actividad entre los hemisferios. El hemisferio lesionado carece de la capacidad de inhibir la actividad del hemisferio indemne, lo que lleva a una inhibición excesiva del hemisferio comprometido tras el ictus. Por ello, algunos investigadores consideran que la mejor recuperación motora después del accidente cerebrovascular a menudo está relacionada con una restauración del equilibrio inter-hemisférico. El monitoreo de estas interacciones inter-hemisféricas durante el entrenamiento BCI podría proporcionar información importante sobre las estrategias de tratamiento, al agregar, por ejemplo, la estimulación magnética transcraneal antes del entrenamiento en el caso de dicha asimetría hemisférica, o al modular la elección de ejercicios dependiendo del tipo de activación cerebral observada (Van Dokkum et al., 2015).

4.2. BCI, imaginería motora y realidad virtual

En relación a las vías de feedback ilustradas en la Figura 2, las representaciones de realidad virtual (VR) permiten obtener retroalimentación en formato tridimensional (3D) de imaginería motora. La realidad virtual es una interfaz que permiten al usuario navegar e interactuar, en tiempo real, con un ambiente tridimensional generado por un computador. La introducción de este sistema ofrece: la capacidad de individualizar las necesidades de tratamiento; proporciona mayor estandarización de los protocolos de evaluación y de entrenamiento, y facilita un contexto más ecológico, funcional y motivador (Guzmán & Londoño, 2016). Ello se relaciona con que el aspecto terapéutico puede ser más lúdico o más realístico al contexto de pertenencia. Del mismo modo que el aprendizaje motor se vuelve más intrínseco y relacionado con la exploración del entorno. Millán et al. (2010) propusieron una BCI en la cual la señal de control se utiliza para navegar dentro de un entorno virtual, girando a la izquierda -mano izquierda- o a la derecha -mano derecha-. Estos autores han evidenciado la importancia de que la retroalimentación virtual sea lo más real posible, ya que a partir de ciertas fallas gráficas los sujetos desmejoraban su percepción y el rendimiento, disminuyendo así el potencial de aprendizaje motor.

Otro aspecto a considerar es que la realidad virtual introduce el aprendizaje observacional del movimiento realizado. Lo cual resulta beneficioso, teniendo en cuenta lo mencionado previamente sobre el mecanismo de neuronas espejo, es que la observación del movimiento activa las mismas redes neuronales que durante la ejecución real del movimiento.

4.3. BCI, imaginería motora y realidad virtual para el movimiento

Esta propuesta es análoga a las anteriores salvo porque se añade la posibilidad de que el paciente obtenga feedback propioceptivo —es decir, un movimiento direccionado según velocidad, posición e intensidad— de acuerdo a su desempeño en la tarea de imaginería motora. ¿Cómo obtiene ese tipo de

retroalimentación? Conectando las BCI con dispositivos externos como ortesis robóticas de mano o sistemas de estimulación eléctrica funcional (FES, por sus siglas en inglés), para que el movimiento imaginado pueda convertirse en una acción abierta. En este sentido, las BCI proporcionan retroalimentación háptica —relativas al procesamiento táctil— y propioceptiva lo cual permite cerrar el bucle sensoriomotor y, por ende, restablecer las vías motoras hasta su inervación. En este sentido, permiten incrementar la eficiencia de la transmisión corticoespinal y la fuerza muscular (Alonso-Valerdi, Salido, Ruiz & Ramirez-Mendoza, 2015).

4.3.1. Estimulación eléctrica funcional

La estimulación eléctrica funcional (FES por sus siglas en inglés) es un método que provoca contracciones musculares mediante el uso de electrodos y de la activación de nervios motores. Por ello, la FES se considera como un sistema que asiste el movimiento. En este sentido, se conjuga la activación del sistema nervioso central (SNC) —mediante tareas de imaginería o realidad virtual—, con la estimulación muscular correspondiente y la retroalimentación sensorial aferente (Meng et al., 2008). Es decir, que la BCI detecta las intenciones motoras del paciente y activa el dispositivo FES para que estimule los músculos asociados si las señales cerebrales emitidas son correctas (Bhattacharyya et al., 2016).

En el caso de la vía visual, y al intervenir sobre la recuperación de la función motora en extremidades superiores, la retroalimentación a menudo incluye un avatar presentado en un monitor que realiza los movimientos simulados, así como electrodos FES —estimulación eléctrica funcional— colocados sobre la extremidad afectada. En la terapia convencional, el paciente imagina que realiza un movimiento como la flexión dorsal de la muñeca, y es el terapeuta quien administra el dispositivo FES para desencadenar el movimiento consignado. Al incorporar las BCI en el circuito de control, la retroalimentación está mucho más estrechamente sincronizada a la imaginería motora del paciente. De manera que el refuerzo positivo, el movimiento del avatar y la activación de FES, sólo son posibles cuando el paciente realiza la imaginería

motora de modo correcto (Remsik et al., 2016; Sabathiel et al., 2016 en Van Dokkum et al., 2015).

Bhattacharyya et al. (2016) compararon el efecto del entrenamiento combinando FES y retroalimentación visual con un grupo que sólo recibía feedback visual y observaron mejoras significativas en la precisión de la ejecución tras 10 sesiones. También Biasiucci et al. (2018) evidenciaron incremento significativo en la extensión de los dedos aplicando BCI controladas por FES para individuos en la fase crónica de accidente cerebrovascular.

4.3.2. Ortesis

Las ortesis constituyen un apoyo u otro dispositivo externo que se aplican al cuerpo para modificar aspectos funcionales o estructurales del sistema neuromusculoesquelético. Un ejemplo de ortesis robóticas son los "guantes inteligentes". Se trata de dispositivos portátiles que ejecutan el movimiento intencional para entrenar los patrones motores (Remsik et al., 2017). Cabe destacar que este recurso resulta especialmente recomendable para pacientes que presentan baja capacidad motora residual en el miembro afectado. En este sentido, la combinación de este procedimiento con los mencionados previamente les ofrece mayores beneficios terapéuticos.

5. Conclusiones

La necesidad de ampliar las perspectivas en neurorrehabilitación de pacientes que han sufrido un ictus es imperante, ya que los abordajes actuales no logran beneficiar a todos los pacientes. La incorporación de interfaces cerebro-computadora al ámbito de la salud aparece como una alternativa promisoriosa para favorecer el proceso de recuperación de los pacientes y así contribuir a su bienestar. No obstante, el estudio y la aplicación de estos sistemas, todavía está en su fase de desarrollo y bastante restringido al ámbito científico. Además, el procedimiento de calibración a cada paciente así como el entrenamiento, insume bastante tiempo y puede resultar tedioso.

La expectativa es que conforme se avance pueda devenir una herramienta más estandarizada, de fácil uso y menor costo, para que, en última instancia, también pueda constituir un complemento terapéutico domiciliario. Ya que la tecnología BCI parece extender los beneficios de la neurorrehabilitación a un gran espectro de condiciones neurológicas, a través de un programa clínico individualizado.

Los esfuerzos actuales se enfocan en mejorar la precisión en la decodificación de las señales cerebrales, ya que este paso resulta fundamental para el proceso general. En este sentido resulta importante contar con mayor evidencia relacionada con la modalidad de señal —i.e. fMRI, EEG, ECoG o MEG—, las áreas del cerebro que deben ser examinadas y las características de la señal —i.e. tasa de picos, potencia de banda y coherencia— que se utilizan para proporcionar retroalimentación (Grosse-Wentrup, Mattia, & Oweiss, 2011).

También, es importante abordar la eficacia según tareas y tiempos (especialmente por su impacto en términos de fatiga y carga mental), la reproducibilidad y la identificación de los mecanismos específicos de acción terapéutica. Asimismo, resulta imprescindible centrarse en el estudio de pacientes —más que en sujetos sanos—, utilizar muestras más grandes y heterogéneas para comprender las diferencias poblacionales e individuales según el tipo de secuelas, severidad y cronicidad (Remsik et al., 2015).

Estos esfuerzos son esenciales para continuar el avance de las tecnologías de BCI hacia la mejora de la calidad de vida y el sentido de autonomía de los sobrevivientes de accidentes cerebrovasculares.

6. Preguntas de estudio

1. ¿Cuál es la diferencia entre BCI rehabilitadoras y de asistencia?
2. ¿Qué ventajas y limitaciones presentan las BCI aplicadas a la rehabilitación motora de pacientes que han sufrido un ictus?
3. Menciona una modalidad de feedback utilizada como salida de las BCI y describe sus principales características.

Referencias

- Alonso-Valerdi, L. M., Salido-Ruiz, R. A., & Ramirez-Mendoza, R. A. (2015). Motor imagery based brain-computer interfaces: An emerging technology to rehabilitate motor deficits. *Neuropsychologia*, 79, 354–363. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2015.09
- Bhattacharyya, S., Clerc, M., & Hayashibe, M. (Oct 2016). A study on the effect of electrical stimulation during motor imagery learning in brain-computer interfacing. Paper presented at the 2840. doi:10.1109/SMC.2016.7844670 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/7844670>
- Bundy, D., Souders, L., Baranyai, K., Leonard, L., Schalk, G., Coker, R., . . . Leuthardt, E. (2017). Contralesional Brain-Computer interface control of a powered exoskeleton for motor recovery in chronic stroke survivors. *Stroke*, 48(7), 1908-1915. doi:10.1161/STROKEAHA.116.016304
- Biasiucci, A., Leeb, R., Iturrate, I., Perdakis, S., Al-Khodairy, A., Corbet, T., Schnider, A., Schmidlin, T., Zhang, H., Bassolino, M., Viceic, D., Vuadens, P., Guggisberg, A. G., . . . Millán, J. (2018). Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke. *Nature communications*, 9(1), 2421. doi:10.1038/s41467-018-04673-z
- Cervera, M. A., Soekadar, S. R., Ushiba, J., Millán, J. d. R., Liu, M., Birbaumer, N., & Garipelli, G. (2018). Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: A meta-analysis. *Annals of Clinical and Translational Neurology*, 5(5), 651-663. doi:10.1002/acn3.544
- Daly, Janis J., PhD, MS|Huggins, Jane E., PhD. (2015). Brain-computer interface: Current and emerging rehabilitation applications. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 96(3), S7. doi:10.1016/j.apmr.2015.01.007
- Dinarès-Ferran, J., Ortner, R., Guger, C., & Solé-Casals, J. (2018a). A new method to generate artificial frames using the empirical mode decomposition for an EEG-based motor imagery BCI. *Frontiers in Neuroscience*, 12 doi:10.3389/fnins.2018.00308
- Frolov, A. A., Mokienko, O., Lyukmanov, R., Biryukova, E., Kotov, S., Turbina, L., . . . Bushkova, Y. (2017). Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: A randomized controlled multicenter trial. *Frontiers in Neuroscience*, 11 doi:10.3389/fnins.2017.00400
- García Cossio, E., & Gentiletti, G. G. (2008). Interfaz cerebro computadora (icc) basada en el potencial relacionado con eventos p300: Análisis del efecto de la dimensión de la matriz de estimulación sobre su desempeño. *Revista*

Ingeniería Biomédica, 2(4), 26-33. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-97622008000200005&lng=en&tlng=en

- Gentiletti, G. G., Tabernig, C. B., & Acevedo, R. C. (2007). Interfaces cerebro computadora: Definición, tipos y estado actual. IV Latin American Congress on biomedical engineering 2007, Bioengineering solutions for Latin America health (pp. 1117-1121) Springer, Berlin, Heidelberg. Retrieved from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-74471-9_259
- Golub, M. D., Sadtler, P. T., Oby, E. R., Quick, K. M., Ryu, S. I., Tyler-Kabara, E. C., . . . Yu, B. M. (2018). Learning by neural reassociation. *Nature Neuroscience*, 21(4), 607-616. doi:10.1038/s41593-018-0095-3
- Grosse-Wentrup, M., Mattia, D., & Oweiss, K. (2011). Using brain–computer interfaces to induce neural plasticity and restore function. *Journal of Neural Engineering*, 8(2), 025004. doi:10.1088/1741-2560/8/2/025004
- Holper, L., Muehlemann, T., Scholkmann, F., Eng, K., Kiper, D., & Wolf, M. (2010). Testing the potential of a virtual reality neurorehabilitation system during performance of observation, imagery and imitation of motor actions recorded by wireless functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 7, 57. doi:10.1186/1743-0003-7-57
- Huggins, J. E., Guger, C., Ziat, M., Zander, T. O., Taylor, D., Tangermann, M., . . . Aarnoutse, E. J. (2017a). Workshops of the sixth international brain-computer interface meeting: Brain-computer interfaces past, present, and future. *Brain-Computer Interfaces*, 4(1-2), 3-36. doi:10.1080/2326263X.2016.1275488
- Jochumsen, M., Cremoux, S., Robinault, L., Lauber, J., Arceo, J., Navid, M., . . . Niazi, I. (2018). Investigation of optimal afferent feedback modality for inducing neural plasticity with A self-paced brain-computer interface. *Sensors*, 18(11), 3761. doi:10.3390/s18113761
- Kim, S. H., Park, J. H., Jung, M. Y., & Yoo, E. Y. (2016). Effects of Task-Oriented Training as an Added Treatment to Electromyogram-Triggered Neuromuscular Stimulation on Upper Extremity Function in Chronic Stroke Patients. *Occupational Therapy International*, 23(2), 165–174. doi:10.1002/oti.1421
- Krakauer, J. W. (2006). Motor learning: Its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation. *Current Opinion in Neurology*, 19(1), 84-90.
- Lazarou, I., Nikolopoulos, S., Petrantonakis, P. C., Kompatsiaris, I., & Tsolaki, M. (2018b). EEG-based Brain–Computer interfaces for communication and rehabilitation of people with motor impairment: A novel approach of the 21st century. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12 doi:10.3389/fnhum.2018.00014

- Mandrick, K., Derosiere, G., Dray, G., Coulon, D., Micallef, J.-P., & Perrey, S. (2013). Prefrontal cortex activity during motor tasks with additional mental load requiring attentional demand: A near-infrared spectroscopy study. *Neuroscience Research*, 76(3), 156–162. doi:10.1016/j.neures.2013.04.006
- Mattout, J., Perrin, M., Bertrand, O., & Maby, E. (2015). Improving BCI performance through co-adaptation: Applications to the P300-speller. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 58(1), 23-28. doi:10.1016/j.rehab.2014.10.006
- Meng, F., Tong, R. K., Chan, S., Wong, W., Lui, K., Tang, K., . . . Gao, S. (July 8, 2008). BCI-FES training system design and implementation for rehabilitation of stroke patients. Paper presented at the IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence). doi:10.1109/ijcnn.2008.4634388
- Millán, J. D. R., Rupp, R., Müller-Putz, G. R., Murray-Smith, R., Giugliemma, C., Tangermann, M., . . . Mattia, D. (2010). Combining brain-computer interfaces and assistive technologies: State-of-the-art and challenges. *Frontiers in Neuroscience*, 4 doi:10.3389/fnins.2010.00161
- Remsik, A., Young, B., Vermilyea, R., Kiekhoefer, L., Abrams, J., Evander Elmore, S., . . . Prabhakaran, V. (2016c). A review of the progression and future implications of brain-computer interface therapies for restoration of distal upper extremity motor function after stroke. *Expert Review of Medical Devices*, 13(5), 445-454. doi:10.1080/17434440.2016.1174572
- Shin, J., Kim, M., Lee, J., et al. (2016). Effects of virtual reality-based rehabilitation on distal upper extremity function and health-related quality of life: a single-blinded, randomized controlled trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 13(1). doi:10.1186/s12984-016-0125-x
- Soekadar, S. R., Birbaumer, N., Slutzky, M. W., & Cohen, L. G. (2015). Brain-machine interfaces in neurorehabilitation of stroke. *Neurobiology of Disease*, 83, 172–179. doi:10.1016/j.nbd.2014.11.025
- Tabernig, Carolina & Carrere, Lucia & Escher, Leandro & Gentiletti, Gerardo & G Spaich, Erika. (2017). Evaluación de Desempeño de un Sistema Basado en Interfaz Cerebro Computadora por Imaginería Motora y Realidad Virtual: Cambios entre y las sesiones de uso. *Cognitive Area Networks*. 4. 100-104.
- Tariq, M., Trivailo, P. M., & Simic, M. (2018). Motor imagery based EEG features visualization for BCI applications doi://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.057
- Van Dokkum, L. E. H., Ward, T., & Laffont, I. (2015). Brain computer interfaces for neurorehabilitation – its current status as a rehabilitation strategy post-stroke. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 58(1), 3–8. doi:10.1016/j.rehab.2014.09.016

- Vourvopoulos, A., & Bermúdez I Badia, S. (2016). Motor priming in virtual reality can augment motor-imagery training efficacy in restorative brain-computer interaction: A within-subject analysis. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 13(1), 69. doi:10.1186/s12984-016-0173-2
- Vourvopoulos, A., Bermúdez I Badia, S., & Ferreira, A. (2016). NeuRow: An Immersive VR Environment for Motor-Imagery Training with the Use of Brain-Computer Interfaces and Vibrotactile Feedback. Presented at the PhyCS 2016 - 3rd International Conference on Physiological Computing Syst, Lisbon