

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ

FACULTAD DE MEDICINA

TRABAJO FIN DE GRADO EN TERAPIA OCUPACIONAL



INTERFAZ CEREBRO-MÁQUINA Y BRAZO ROBÓTICO EN LA
REHABILITACIÓN DEL MIEMBRO SUPERIOR POST-ICTUS: REVISIÓN
BIBLIOGRÁFICA

Autor/a: Domínguez Lucio, Sara.

Nº expediente: 1196

Tutor/a: Serrano Reina, Encarnación

Departamento de patología y cirugía

Área de radiología y medicina física

Curso académico: 2019- 2020

Convocatoria: diciembre 2019

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Objetivos	7
Metodología	8
Resultados	10
Discusión	17
Conclusión	20
Bibliografía	21



RESUMEN

Introducción. Cerca del 85% de los supervivientes de ictus presenta déficits motores en el miembro superior, en consecuencia, sufren un deterioro en la autonomía del desempeño de las actividades de la vida diaria, y por ende en la calidad de vida.

Numerosos estudios sostienen que las terapias robóticas con interfaces cerebro-máquina y exoesqueletos podrían reportar mejoras distintas a las de la terapia convencional y complementarla para obtener mejores resultados en la intervención. Debido a que permiten aumentar la intensidad de los ejercicios, aumentando el número de repeticiones y proporcionan un control más preciso y una evaluación más exhaustiva de la función del miembro superior del usuario.

Objetivos. Analizar la efectividad de las interfaces cerebro-máquina y los exoesqueletos de miembro superior en la rehabilitación del miembro superior post-ictus, determinar si la aplicación de ambas tecnologías presenta ventajas respecto a la terapia convencional y conocer el grado de implementación de las mismas en el ámbito clínico.

Metodología. Se ha realizado una búsqueda en las bases de datos de Scopus, Science Direct y PubMed, Se ha revisado un total de 639 artículos, de los cuales se han incluido 10 en la revisión.

Resultados. Incrementos en las puntuaciones del ARAT, FMMA y fuerza de prensión, aumentos en el rango articular y la coordinación de la mano. Y en menor medida mejoras en el desempeño de las AVD.

Conclusión. Pese a que los resultados reportados respecto a la efectividad de esta tecnología son positivos, se requieren nuevos estudios para lograr un alto nivel de evidencia.

Ictus, Miembro Superior, Interfaz Cerebro-Máquina, Exoesqueletos

ABSTRACT

Introduction. About 85% of stroke survivors have upper limb impairments, consequently suffer a decrease in the autonomy to carry out the activities of daily living and therefore in the quality of life.

Large number of studies supports that robotic therapies with brain-computer interfaces and exoskeletons may report different improvements than conventional therapy, and complement it to effects better rehabilitative outcomes results. Because they allow to increase the intensity of the exercises, increasing the number of repetitions, and provide control that is more accurate and an exhaustive evaluation of the user's upper limb function.

Objectives. Analyzing the effectiveness of brain-computer interfaces and upper limb exoskeletons in the rehabilitation of post-stroke upper limb, determine whether the application of both technologies has advantages over conventional therapy, and to know the degree of implementation of the same in the clinical field.

Method. A search have been carried out in the databases Scopus, Science Direct and Pubmed. A total of 639 articles have been reviewed, of which 10 have been included on the review.

Results. Increases in ARAT, FMMA and Grip Strength scores, increases in joint range and coordination of the hand. To a lesser extent, improvement in ADLs performance.

Conclusions. Although the results reported regarding the effectiveness of this technology are positive, new studies are required to achieve a high level of evidence.

Stroke, Upper Limb, Brain-Computer Interface, Exoskeleton Device

INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud, el ictus es una de las primeras causas de muerte y discapacidad desde 1990 ⁽¹⁾. Afecta aproximadamente al 14% de la población mundial ⁽²⁾. Además, el número de personas con probabilidad de padecer un ictus está incrementándose mundialmente debido al envejecimiento de la población ⁽³⁾. Cerca del 85% de los supervivientes presenta déficits motores en el miembro superior ⁽⁴⁾, lo cual repercute en la autonomía del desempeño de las actividades de la vida diaria (AVD) ⁽¹⁾, y deteriora la calidad de vida del paciente y de su familia, además de generar unos costes económicos muy altos para ambos y para el sistema sanitario ⁽⁵⁾.

Tras finalizar el proceso de rehabilitación, un número significativo de usuarios presentan limitaciones funcionales del miembro superior, sobretodo, en las destrezas de alcance y agarre ⁽⁶⁾. Por estos motivos se considera necesario mejorar e implementar nuevos procedimientos y técnicas al proceso de rehabilitación de esta patología ⁽³⁾.

La Terapia Ocupacional es una profesión esencial dentro de los equipos multidisciplinares, que llevan a cabo el proceso de rehabilitación de personas que han padecido un ictus ⁽⁷⁾. Debido a que tiene como objetivo principal favorecer el desempeño de las actividades de la vida diaria, mediante la mejora de las destrezas dañadas, y enseñando a los usuarios a emplear estrategias compensatorias cuando los déficits son permanentes ⁽⁸⁾. El terapeuta ocupacional emplea actividades significativas guiadas por él, para lograr que el usuario supere, reduzca o compense las limitaciones que presenta que interfieren en su independencia en las ocho áreas de ocupación (actividades básicas de la vida diaria, actividades instrumentales de la vida diaria, educación, ocio y tiempo libre, participación social, trabajo, juego y descanso y sueño) ⁽⁹⁾. La intervención está constituida por un tratamiento global, que potencia las áreas funcional, motora, sensorial, perceptiva y cognitiva ⁽⁸⁾, además del asesoramiento a las familias y cuidadores de los usuarios, la prescripción de productos de apoyo, y las

adaptaciones del entorno, tanto del centro como del domicilio ⁽⁹⁾.

Por ello, los usuarios que han sufrido un ictus, que reciben una intervención de terapia ocupacional, enfocada a las actividades de la vida diaria que forman parte de su rutina habitual anterior al ictus, tienen más probabilidades de ser independientes ⁽⁷⁾. Además, este aumento de la independencia de los usuarios podría suponer una disminución de los costes económicos personales, familiares y sociales ⁽⁸⁾.

Actualmente la robótica aplicada a la rehabilitación del ictus está experimentando un rápido y creciente desarrollo ⁽¹⁰⁾. Esto podría constituir una de las claves para la mejora del proceso de rehabilitación complementando a la terapia convencional, minimizando las limitaciones funcionales y por ende aumentando la autonomía en las actividades de la vida diaria ⁽¹¹⁾, lo cual supondría además una reducción en los costes económicos del sistema sanitario ⁽²⁾.

Numerosos investigadores han estudiado la eficacia de la terapia robótica en la rehabilitación del miembro superior post-ictus ⁽¹⁰⁾. Entre estas terapias se encuentran los exoesqueletos y las interfaces cerebro-máquina.

Los exoesqueletos son dispositivos diseñados para sustituir, complementar o mejorar las funciones y capacidades humanas, y se mantienen en continua interacción física con la persona que lo maneja proporcionándole un feedback constante ⁽¹²⁾. Están formados por segmentos y articulaciones equivalentes a los de la anatomía del miembro al que se adjunta, y funciona mediante los grados de libertad correspondientes a los de las articulaciones humanas. Ya que debe cumplir con los movimientos del usuario que lo va a emplear y aplicar parte de la potencia requerida para realizar dichos movimientos ⁽²⁾. De acuerdo con el principio de acción pueden dividirse en exoesqueletos pasivos y activos. Los exoesqueletos pasivos funcionan mediante la fuerza humana y la energía cinética, mientras que los activos funcionan mediante fuerzas de energía externas. Por otro lado, pueden ser clasificados en exoesqueletos de miembro superior, diseñados para mejorar la función de manipulación; de miembro

inferior, empleados para proporcionar soporte, estabilidad y movilidad; y de cuerpo entero, en función del segmento corporal al que se ajusten ⁽¹²⁾. Inicialmente los exoesqueletos se emplearon para proporcionar un incremento de la fuerza para lograr que los soldados cargaran más peso. Posteriormente se ampliaron los campos de aplicación, extendiéndose a la neurorehabilitación de miembros superiores e inferiores ⁽¹³⁾. La primera aplicación terapéutica tuvo lugar en 1970 ⁽¹⁴⁾, empleándose para la rehabilitación de usuarios con lesión medular. Actualmente la mayoría de la literatura respectiva a la aplicación terapéutica de los exoesqueletos se centra en la rehabilitación de la parálisis de los miembros post-ictus. Aplicados al miembro superior numerosos estudios afirman que pueden mejorar la recuperación motora y la neuroplasticidad, proporcionando mayor intensidad, control del movimiento y número de repeticiones al entrenamiento ^(2,11,14), además de aportar medidas más precisas en términos de rango de movimiento articular, fuerza ejercida, precisión, velocidad de ejecución y finalización de las tareas y tiempos de reacción. Otro factor a destacar, es la importancia de la motivación para lograr la adherencia del usuario al tratamiento, la cual puede ser incrementada implementando juegos de ordenador con la dificultad de la tarea automatizada a la terapia ⁽¹⁰⁾.

Las interfaces cerebro-máquina (BCIs) son sistemas que permiten la comunicación entre el cerebro humano y un ordenador, sin necesidad de emplear las vías neurofisiológicas normales ⁽¹⁵⁾. Traducen las señales eléctricas del cerebro del usuario en comandos para controlar un dispositivo externo ⁽¹⁶⁾. Pueden ser clasificadas en BCIs invasivas y no invasiva, en función de las técnicas de neuroimagen empleadas para la extracción de los impulsos eléctricos cerebrales. Las no invasivas emplean la electroencefalografía (EEG) para adquirir las señales electrofisiológicas producidas por las neuronas y las sinapsis del sistema nervioso central. Sin embargo, las invasivas requieren cirugía para implantar mioelectrodos dentro del cráneo, la cual puede realizarse a diferentes niveles de invasividad, desde intracortical a epidural ⁽¹⁶⁾.

Actualmente las interfaces más empleadas son las no invasivas, ya que la EEG proporciona una alta resolución temporal, mayor portabilidad e implica menor coste y riesgo para el usuario ⁽¹⁷⁾.

Por otro lado, en el ámbito clínico las BCIs pueden clasificarse en rehabilitadoras, destinadas a facilitar la recuperación de la función cerebral, normalizando la actividad neurofisiológica, y en BCIs destinadas a la asistencia, empleadas para sustituir las funciones perdidas, asistiendo en el desempeño de las actividades de la vida diaria ⁽¹⁵⁾.

La primera interfaz apareció en 1973, sin embargo, no comenzó a desarrollarse activamente hasta 1990 ⁽¹⁸⁾, época en la que fueron introducidos en la literatura de neurociencias, mediante la publicación de una serie de estudios en ratas y monos. En las dos últimas décadas se han incrementado significativamente el desarrollo de las BCIs para la rehabilitación ⁽¹⁷⁾. Basadas principalmente en las tareas de imaginación motora. Debido a que la imaginación y la ejecución de los movimientos activa las mismas estructuras cerebrales ⁽¹⁸⁾, la interfaz registra los impulsos eléctricos cerebrales durante la imaginación del movimiento y los traduce en comandos para controlar un dispositivo externo que controle el miembro afecto y realice el movimiento, estimulando de este modo las vías neurológicas dañadas, fomentando los procesos de neuroplasticidad ⁽¹⁷⁾. Gran cantidad de estudios sostienen el potencial de los sistemas BCI para restablecer el control motor del miembro afecto en usuarios que han padecido un ictus ⁽²⁰⁾.

Numerosos estudios afirman que los sistemas más efectivos para la neurorehabilitación actualmente consisten en aplicar la interfaz cerebro-máquina en conjunto con un exoesqueleto, ya que pueden emplearse para inducir la plasticidad del sistema nervioso vinculando la actividad cortical motora con una retroalimentación propioceptiva y visual ⁽¹⁹⁾. Y podrían reportar mejoras distintas a las de la terapia convencional y complementarla para obtener mejores resultados en la intervención ⁽²¹⁾. Debido a que permiten aumentar la

intensidad de los ejercicios, aumentando el número de repeticiones, sin las limitaciones de la fatiga física y mental del terapeuta ⁽¹¹⁾, además proporcionan un control más preciso del movimiento y una evaluación más exhaustiva de la función del miembro superior del usuario ⁽¹²⁾.

OBJETIVOS:

Por ello, los objetivos que se plantean en esta revisión son: analizar la efectividad de las BCIs y los exoesqueletos de miembro superior en la rehabilitación del miembro superior post-ictus, determinar si la aplicación de ambas tecnologías presenta ventajas respecto a la terapia convencional y conocer el grado de implementación de estas tecnologías en el ámbito clínico.



METODOLOGÍA:

FUENTES DE INFORMACIÓN

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica en las principales bases de datos del ámbito sanitario de acceso a través de los recursos electrónicos de la Universidad Miguel Hernández de Elche, Scopus, Science Direct y Pubmed.

Las **palabras clave** empleadas fueron las siguientes: stroke/upper limb/ brain-computer interface/exoskeleton device. Unidas mediante el **operador booleano** “AND”.

Se aplicaron las siguientes **estrategias de búsqueda**:

- ((Brain-computer interface) AND (stroke) AND (exoskeleton device))
- “Brain-computer interface” AND stroke AND “exoskeleton device” AND “upper limb”

CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD

Criterios de inclusión:

- Estudios en inglés, español y francés
- Estudios que incluyan a pacientes tratados con una interfaz cerebro-máquina y un exoesqueleto de miembro superior
- Estudios de los últimos cinco años
- Estudios que incluyan a pacientes que han padecido un ictus

Criterios de exclusión:

- Artículos que no contengan texto completo y resumen
- Estudios realizados en animales
- Estudios que empleen métodos de evaluación no estandarizados
- Estudios que empleen otros tratamientos robóticos además de una interfaz cerebro-máquina y exoesqueleto de miembro superior

SELECCIÓN DE ESTUDIOS

Mediante las anteriores estrategias de búsqueda se obtuvieron un total de 639 artículos, tras eliminar los duplicados se revisaron 621. Posteriormente se excluyeron 611 estudios siguiendo los criterios de elegibilidad establecidos, siendo incluidos por lo tanto 10 artículos para la elaboración de los resultados, 8 ensayos clínicos y 2 revisiones bibliográficas.

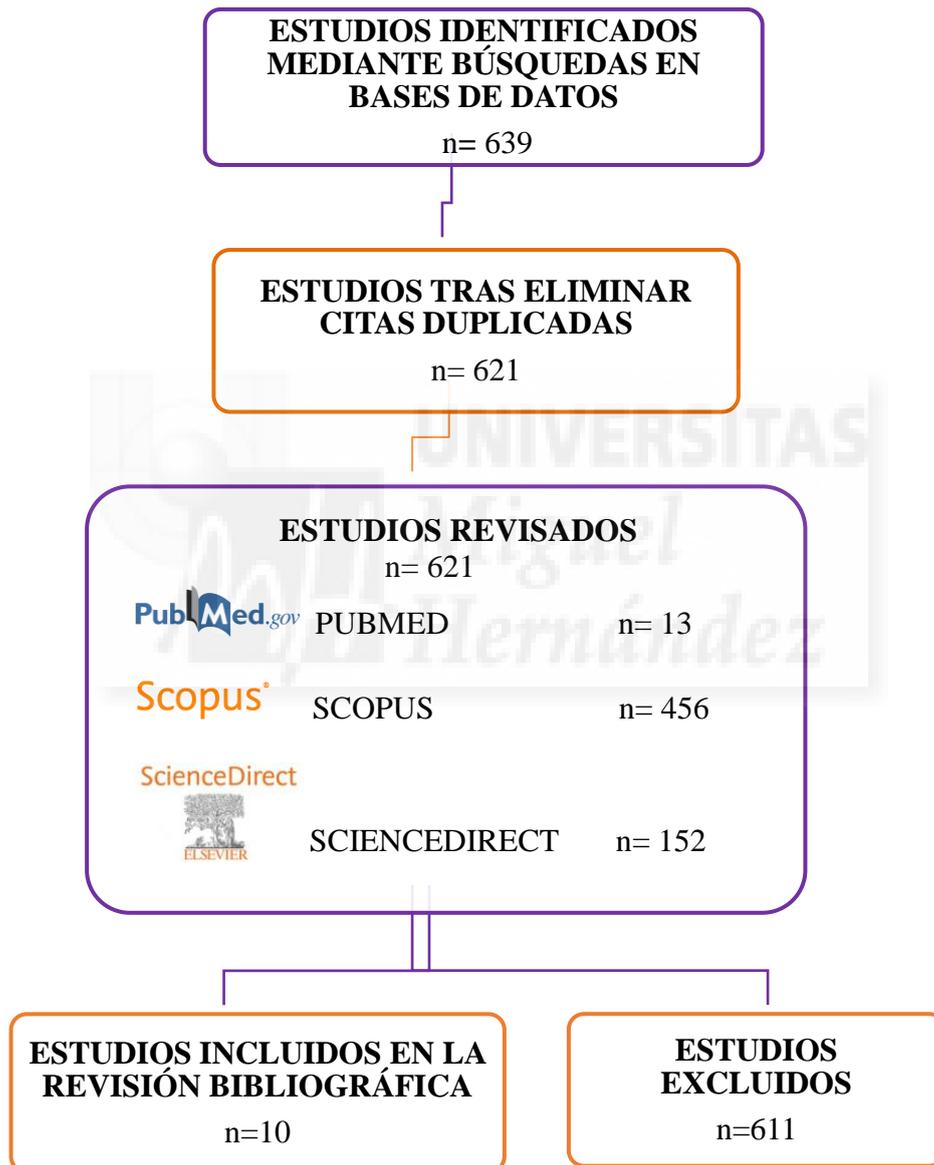


Figura I. Proceso de búsqueda y selección de artículos

RESULTADOS:

Título del artículo	Brain–Computer Interface: The First Experience of Clinical Use in Russia
Autor y año	Mokienko OA, Lyukmanov RK, Chernikova LA, Suponeva NA, Piradov MA, Frolov AA. 2016
Tipos de estudio	Ensayo clínico
Objetivos	Evaluar la posibilidad de aprender a gestionar una BCI basada en imaginería motora en pacientes con daño severo de la corteza motora, e investigar la eficacia clínica de esta tecnología en pacientes con déficits motores severos.
Características muestra	- N: 36 pacientes en la primera fase y 19 en la segunda. - Criterios de inclusión: pacientes de entre 18 y 80 años, diagnosticados de ictus al menos hace un mes, o de traumatismo craneoencefálico con un único foco que tengan paresia o plejia de mano.
Variables estudiadas	Función motora de la mano, medido mediante ARAT (Action Research Arm Test) y Fugl-Meyer , y espasticidad a través de Ashworth modificada .
Metodología	10-15 días de tratamientos con 1 sesión diaria de 20-30 minutos. Paciente sentado a 1 metro del monitor del ordenador, en el cual aparecen ordenes aleatorias 10 segundos, con un intervalo de 10 segundos. Se llevaron a cabo dos fases de intervención: en la primera fase 16 pacientes realizaron movimientos de abrir y cerrar el puño empleando una BCI y recibieron feedback visual, y 20 pacientes recibieron únicamente terapia convencional. En la segunda fase 19 pacientes realizaron movimientos de extensión de dedos empleando una BCI y un exoesqueleto de mano y recibieron feedback visual y cinestésico.
Resultados	En cuanto a la primera fase, en el grupo control no hubo cambios en la función motriz de la mano. El grupo de tratamiento obtuvo mejoras significativas en la función motora según el ARAT. Las mejoras fueron mayores en los pacientes que se encontraban en la fase de rehabilitación temprana. En cuanto a la segunda fase, se obtuvo una mejora de los movimientos activos de la mano, principalmente en las zonas distales. La espasticidad no aumentó al emplear el exoesqueleto.
Título del artículo	Rehabilitation of Stroke Patients with a Bioengineered “Brain–Computer Interface with Exoskeleton” System
Autor y año	Kotov SV, Turbina LG, Bobrov PD, Frolov AA, Pavlova OG, Kurganskaya ME, et al. 2016
Tipos de estudio	Ensayo clínico
Objetivos	Estudiar el potencial de un sistema con un programa de ordenador que reconozca, clasifique y transmita las señales EEG, para convertirlas en controles a tiempo real, combinado con un exoesqueleto de mano y una BCI, en la rehabilitación motora del miembro superior hemiparético post-ictus.
Características	- N: 5 pacientes con ictus

muestra	- Criterios de inclusión: pacientes con hemiparesia de miembro superior por ictus, entre 30 y 66 años de edad con una duración del ictus de entre 2 meses y 4 años
VARIABLES ESTUDIADAS	Desempeño de las actividades de la vida diaria medida mediante Índice de Barthel , grado de discapacidad usando escala Rankin Modificada , espasticidad con Ashworth modificada y estado neurológico mediante la NIHSS .
Metodología	Curso de 8-10 sesiones diarias con una BCI y un exoesqueleto en el miembro afecto. Paciente sentado en frente del monitor del ordenador, en el cual irán apareciendo diversas instrucciones, se empleó la técnica de imaginación motora. Se realizaron 3-5 sesiones de 5-10 minutos para cada movimiento.
Resultados	Al finalizar el estudio los pacientes mostraron cambios positivos en el estado neurológico, mejor fuerza, rango y coordinación de los movimientos del miembro parético. En menor medida, disminuyó la espasticidad y mejoró levemente la función sensitiva. Además disminuyó el grado de discapacidad y dependencia en las actividades de la vida diaria. Las mejoras fueron mayores en aquellos pacientes que comenzaron la rehabilitación más temprana.
Título del artículo	Contralesional Brain-Computer Interface Control of a Powered Exoskeleton for Motor Recovery in Chronic Stroke Survivors
Autor y año	Bundy DT, Souders L, Baranyai K, Leonard L, Schalk G, Coker R, et al. 2017
Tipos de estudio	Ensayo clínico
Objetivos	Determinar si un exoesqueleto controlado por una BCI, usando señales EEG del hemisferio no afecto, puede mejorar la rehabilitación funcional del miembro superior en pacientes con hemiparesia por ictus en fase crónica
Características muestra	- N: 10 pacientes con hemiparesia de miembro superior por ictus crónico - Criterios de inclusión: hemiparesia de miembro superior moderada-severa, haber transcurrido 6 meses desde el ictus, espasticidad según Ashworth modificada $\leq 1+$, sensibilidad intacta y rango articular pasivo completo de codo, muñeca y dedos.
VARIABLES ESTUDIADAS	Función motora del miembro superior medida mediante ARAT (Action Research Arm Test) e Índice de motricidad y fuerza de agarre , el rango articular activo de las metacarpofalángica mediante goniometría y desempeño ocupacional mediante COPM (Medida Canadiense de Desempeño Ocupacional)
Metodología	12 semanas de intervención en casa, con un mínimo de 5 sesiones de 10-12 minutos por semana, empleando la BCI y el exoesqueleto en el miembro afecto, sentado frente a un monitor de ordenador en el cual aparecen instrucciones de movimientos aleatorios. Cada dos semanas se realizó una sesión de evaluación en el laboratorio.
Resultados	Tras la intervención, se obtuvo un aumento estadísticamente significativo en la función motora del miembro superior medida con el ARAT. También hubo un incremento de la fuerza de agarre, el desempeño ocupacional y el ratio de satisfacción de los usuarios. A mayor número de sesiones, presentaron menor fatiga y mejores

	puntuaciones.
Título del artículo	Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial
Autor y año	Frolov AA, Mokienco O, Lyukmanov R, Biryukova E, Kotov S, Turbina L, et al. 2017
Tipos de estudio	Ensayo clínico aleatorizado
Objetivos	Investigar si el entrenamiento activo mediante un exoesqueleto de mano controlado por una BCI, después de un ictus subagudo y crónico, produce mejores resultados clínicos que el entrenamiento con un exoesqueleto no controlado por la actividad cerebral durante la imaginería motora.
Características muestra	- N : 74 pacientes - Criterios de inclusión : hombres o mujeres que hayan recibido tratamiento hospitalario en el centro de estudio, entre 18 y 80 años, con ictus subagudo o crónico, con un solo foco de localización supratentorial, y que presenten paresia de mano (leve-plejía)
VARIABLES estudiadas	Función del miembro superior medido mediante el Fugl-Meyer y ARAT (Action Research Arm Test), y espasticidad medida mediante la escala Ashworth modificada .
Metodología	55 pacientes recibieron tratamiento mediante un exoesqueleto controlado por una BCI y 19 tratamiento únicamente con un exoesqueleto. Se realizaron 10 sesiones diarias de 30 minutos, descansando fines de semana y vacaciones. Ambos grupos recibieron además terapia física convencional.
Resultados	Ambos grupos mostraron mejoras en la función motora del miembro superior en el Fugl-Meyer y en el ARAT. En el grupo BCI, el porcentaje de pacientes que superan el MCID (diferencia mínima clínica significativa) fue 4.3 veces mayor. Tras 20-30 minutos todos mostraron fatiga por la alta demanda de concentración.
Título del artículo	System Framework of Robotics in Upper Limb Rehabilitation on Poststroke Motor Recovery
Autor y año	Zhang K, Chen X, Liu F, Tang H, Wang J, Wen W. 2018
Tipos de estudio	Revisión bibliográfica
Objetivos	Explorar el estado actual de la rehabilitación robótica del miembro superior. Proporcionar una descripción general del diseño y los efectos clínicos de la misma y describir las interacciones hombre-máquina, estrategias de control y modos de entrenamiento.
Características muestra	No hay muestra
VARIABLES estudiadas	No existen variables
Metodología	Se revisó la literatura desde 1985 hasta 2017, acerca de la tecnología que conforma los sistemas de rehabilitación robótica, los robots capaces de asistir los movimientos del miembro superior en pacientes con ictus y las estrategias de control e interacciones máquina-humano.
Resultados	La BCI combinada con un exoesqueleto puede conducir al aprendizaje motor e inducir la neuroplasticidad para la mejora de la función

	<p>motora. El uso de exoesqueletos en la rehabilitación postictus ha demostrado mejoras en la función motora y en el desempeño de las actividades de la vida diaria. Lo más adecuado es emplear estos métodos en conjunto con la rehabilitación convencional para establecer un escenario de rehabilitación potente y preciso.</p>
Título del artículo	Active Physical Practice Followed by Mental Practice Using BCI-Driven Hand Exoskeleton: A Pilot Trial for Clinical Effectiveness and Usability
Autor y año	Chowdhury A, Meena YK, Raza H, Bhushan B, Uttam AK, Pandey N, et al. 2018
Tipos de estudio	Ensayo clínico
Objetivos	Investigar la efectividad de un sistema de rehabilitación basado en una etapa de entrenamiento físico activo asistido por un exoesqueleto de mano, seguido de una etapa de entrenamiento mental basada en un exoesqueleto de mano controlado por una BCI.
Características muestra	<p>-N: 4 pacientes</p> <p>-Criterios de inclusión: hombres y mujeres con ictus, al menos un mes desde el primer episodio, entre 18 y 80 años, que presente limitaciones en al menos una mano, tener visión normal o corregida y capaz de seguir dos instrucciones verbales o escritas.</p>
Variables estudiadas	Función motora de miembro superior medida con ARAT (action research arm test) y fuerza de prensión con dinamómetro .
Metodología	6 semanas, 2-3 sesiones por semana. Los primeros 30 minutos práctica físico con exoesqueleto en modo de asistencia graduada, seguido de 16 minutos de calibración de la BCI. Y finalmente 30 minutos de práctica mental, sentado frente al monitor del ordenador, consistente en 3 fases de BCI basado en neurofeedback, cada una formada por 40 ensayos. 2 minutos de descanso tras cada fase.
Resultados	Todos los participantes aumentaron la fuerza de prensión durante las sesiones. También obtuvieron cambios sustanciales en la función motriz del miembro superior medida con el ARAT. Disminuyó la fatiga y aumentaron el estado de ánimo y la motivación. La espasticidad no aumentó.
Título del artículo	Recovery Dynamics in Patients with Poststroke Motor Disorders after Multiple Courses of Neurorehabilitation Using an Exoskeleton Controlled by a Brain-Computer Interface
Autor y año	Kotov SV, Turbina SG, Kondur AA, Zaytseva EV, Biryukova EV. 2018
Tipos de estudio	Ensayo clínico
Objetivos	Estudiar los efectos de múltiples sesiones de neurorehabilitación con BCI y exoesqueleto de mano en la restauración de los movimientos y resocialización de los pacientes durante el primer año tras un ictus
Características muestra	<p>-N: 7 pacientes con ictus</p> <p>-Criterios de inclusión: padecer un ictus primario isquémico o hemorrágico, con una duración de dos meses a dos años, déficits motores de la mano de diversa severidad (de paresia leve a plejía) y tener entre 18 y 80 años de edad.</p>
Variables	Estado motor medido mediante el British muscle strenght scale ,

estudiadas	escala Ashworth modificada, ARAT (action research arm test), Fugl- Meyer upper limb y MRC-SS , funciones cognitivas mediante MoCA (Montreal cognitive assessment) y Schulte tables , ansiedad y depresión mediante la HAD (escala hospitalaria de ansiedad y depresión), nivel de adaptación al contexto social a través del Método TOBOL , grado de discapacidad y desempeño de las AVDs a través del Índice de Barthel y la Escala Rankin Modificada .
Metodología	Ciclos de 3 sesiones de 10 minutos, con descansos de 3 minutos. Cada paciente realizó al menos 2 ciclos con intervalos de 6 meses. Las sesiones se realizaron con un exoesqueleto acoplado al miembro afecto del paciente, y un gorro en la cabeza que recoge las señales EEG. El paciente permanece sentado frente al monitor del ordenador, en el cual aparecen instrucciones de diversos movimientos, y se realizaron ejercicios de imaginación motora.
Resultados	Los pacientes mostraron una tendencia a mejorar los movimientos de la mano. Los valores de la función motora al final del primer ciclo y al principio del segundo, mostraron un deterioro durante el descanso, sin embargo, al realizar el segundo ciclo se alcanzó el nivel anterior y posteriormente mejoró. Hubo un aumento en el Rankin y el MRC scale tras el segundo ciclo. La eficiencia de trabajo y la estabilidad fisiológica aumento tras el segundo ciclo.
Título del artículo	Use of Robotic Devices in Post-Stroke Rehabilitation
Autor y año	Frolov AA, Kozlovskaya IB, Biryukova EV, Bobrov PD. 2018
Tipos de estudio	Revisión bibliográfica
Objetivos	Revisar la literatura acerca de los sistemas robóticos usados en neurorehabilitación y presentar datos clínicos que demuestren la efectividad de los exoesqueletos controlados por una BCI, para restaurar la función motora en pacientes con ictus.
Características muestra	No hay muestra
Variables estudiadas	No existen variables
Metodología	Se revisaron los dispositivos robóticos usados en neurorehabilitación, los requisitos fisiológicos para el uso de los mismos en la rehabilitación post ictus y el uso de la tecnología BCI más un exoesqueleto en estudios clínicos.
Resultados	La terapia robótica puede mejorar la recuperación de la función del miembro superior y ayudar a la relajación del usuario, la eficacia depende principalmente del grado de implicación del usuario. Estudios clínicos de exoesqueletos controlados por BCI han demostrado la validez de este método y el aumento de la participación activa del paciente en el tratamiento con él. Sin embargo, no hay estudios acerca de los efectos a largo plazo.
Título del artículo	Use of a BCI-Exoskeleton Simulator with Multichannel Biofeedback in a Multidisciplinary Rehabilitation Program in Poststroke Patients
Autor y año	Ivanova GE, Bushkova YV, Suvorov AY, Stahovskaya LV, Dzhalagoniya IZ, Varako NA, et al. 2018
Tipos de	Ensayo clínico

estudio	
Objetivos	Estudiar la efectividad del uso de un exoesqueleto de mano controlado por una BCI con retroalimentación cinestésica en la rehabilitación de pacientes con ictus, en cuanto a mejorar y/o restaurar la función del miembro superior en las actividades de la vida diaria.
Características muestra	-N: 10 pacientes - Criterios de inclusión: ictus entre 1 mes y 2 años de duración, paresia en mano (paresia leve-plejia) y entre 18 y 80 años de edad.
VARIABLES estudiadas	Función cognitiva medida a través de Schulte tables y MoCA (Montreal Cognitive Assessment); Grado de discapacidad a través del Índice de Barthel y la Escala Rankin Modificada ; Función motora del miembro superior mediante Ashworth modificada , ARAT (action research arm test), Fugl- Meyer , Scandinavian muscle strength assessment scale e Índice de Actividades de Frenchay .
Metodología	14-18 días con intervalos de 2 días de descanso, de entrenamiento ideomotor controlado, utilizando la retroalimentación visual y cinestésica y las señales EEG. 3 sesiones de 10 minutos con descansos de al menos 5 minutos para aprender a manejar la tecnología.
Resultados	Se obtuvieron mejoras estadísticamente significativas en la función motora de la mano en ARAT y Fugl-Meyer, y en el descenso de la espasticidad según la Ashworth modificada. También hubo un leve aumento en el desempeño de las actividades de la vida diaria según el Barthel y una mejora en el desempeño de las tareas bimanuales.
Título del artículo	Brain-Machine Interface Driven Post-stroke Upper-limb Functional Recovery Correlates with Beta-band Mediated Cortical Networks
Autor y año	Rathee E, Chowdhury A, Meena YK, Dutta A, McDonough S. 2019
Tipos de estudio	Ensayo clínico
Objetivos	Examinar los cambios longitudinales en las redes de conectividad funcional, asociados a la recuperación funcional del miembro superior post-ictus mediante un exoesqueleto de mano controlado por una BCI, empleando la imaginaria motora.
Características muestra	-N: 4 pacientes de ictus con déficit de miembro superior - Criterios de inclusión: ictus isquémico que haya causado una discapacidad de miembro superior, mínimo desde hace seis meses, entre 18 y 80 años y sin antecedentes neurológicos previos.
VARIABLES estudiadas	Función motora de miembro superior medida con ARAT (action research arm test) y fuerza de prensión con dinamómetro .
Metodología	6 semanas. Primeros 30 minutos de sesión, práctica física basada en ejercicios con un exoesqueleto de mano en el modo de asistencia graduada. Seguido de 46 minutos (incluida la calibración de la BCI) de práctica mental consistente en el uso de la BCI. Además recibieron fisioterapia y terapia ocupacional.
Resultados	Los pacientes presentaron un aumento continuo en la función motriz del miembro superior según el ARAT. De forma parecida hubo una mejora de todos los pacientes en la fuerza de prensión medida con el dinamómetro.

Figura II. Estudios incluidos en la revisión

Todos los estudios presentaron aumentos estadísticamente significativos en la función del miembro superior parético, medida mediante el ARAT y el FMMA, e incrementos en la fuerza de agarre. Las mejoras fueron mayores en aquellos pacientes que se encontraban en la fase temprana de rehabilitación. Algunos artículos reportaron cambios positivos en el estado neurológico, mayor rango, fuerza y coordinación de los movimientos del miembro superior y un aumento en el desempeño de las tareas bimanuales.

También obtuvieron una disminución en el grado de discapacidad mediada con el Rankin, y mejoras en el desempeño de las AVD, medidas a través de Índice de Barthel y la COPM.

Tras usar un exoesqueleto ningún paciente presentó aumentos de la espasticidad, en algunos ensayos se logró una leve disminución de la misma.

Además, se observó que, a mayor número de sesiones, menor fatiga presentaron los usuarios y mayor fue la participación activa en la intervención.

Los autores coinciden en que el uso de un exoesqueleto de miembro superior controlado por una BCI puede conducir al aprendizaje motor e inducir la neuroplasticidad. Y el modo más adecuado de emplearlos es en conjunto con la terapia convencional.

DISCUSIÓN

Todos los estudios reportaron mejoras clínicamente significativas en pacientes crónicos y subagudos, en la función del miembro superior parético, expresadas en un incremento en las puntuaciones del ARAT, FMMA y fuerza de prensión, y en el rango articular y coordinación de la mano. Las cuales no estuvieron ligadas a los cambios en la fuerza muscular del brazo, sino a la neuroplasticidad en la corteza motora cerebral, mediante la combinación de la activación cortical y la retroalimentación visual y propioceptiva contingente con la imaginación del movimiento específico, que proporciona el uso de un exoesqueleto controlado por una BCI empleando la imaginería motora.

También se identificaron mejoras significativas en las medidas subjetivas referentes al uso de la mano en tareas funcionales y una reducción en el grado de discapacidad. Y en menor medida mejoras en el desempeño de las AVD.

En los ensayos se obtuvo un aumento de la motivación y satisfacción en los usuarios. Esto supone un incremento de la implicación y participación activa del paciente, el cual es un factor muy importante para la eficacia del tratamiento.

El efecto secundario más común en los pacientes fue la fatiga, sin embargo, ninguno abandono el estudio por ello.

Los autores coinciden en que el mejor modo de emplear esta tecnología es en conjunto con métodos de rehabilitación convencional para establecer un escenario de rehabilitación preciso y efectivo.

Sin embargo, estos resultados se encuentran sesgados debido a que los estudios presentan las siguientes limitaciones:

El tamaño muestral empleado en los estudios era muy reducido, entre 4 y 10 pacientes, salvo un estudio (74 pacientes). Además, la muestra era muy heterogénea, la edad comprendía de 18 a 80 años, salvo dos estudios (de 40 a 72 y de 30 a 66), la severidad de los déficits del

miembro superior variaba de paresia leve a plejia y la duración del ictus abarcaba de 1 mes a 8 años.

De los diez artículos, únicamente dos de ellos tenía grupo control-placebo, y en uno de ellos el número de sujetos en el grupo de estudio era mucho mayor que en el de control.

La mayoría de los ensayos evalúan la función motora mediante el FMMA, el cual es versátil y detallado, y mediante el ARAT, que evalúa destrezas necesarias para las AVD. Ambos instrumentos están validados por la comunidad científica lo cual les confiere validez, reproductibilidad y fiabilidad, sin embargo, en pacientes con limitaciones severas no son suficientemente sensibles.

Tres de los ensayos clínicos evaluaron las AVD, uno de ellos empleo únicamente el Barthel, el cual considero poco sensible al cambio en intervenciones de tan corta duración.

Cabe destacar que en los estudios no se llevó a cabo una evaluación de la efectividad a largo plazo, lo cual dificulta conocer si los resultados permanecen a lo largo del tiempo.

Por último, los artículos revisados no especifican los métodos y técnicas que se emplearon en la terapia convencional, lo cual considero necesario en un colectivo con manifestaciones y métodos de intervención tan diversos.

Respecto a las consecuencias para la práctica clínica, el uso de un exoesqueleto controlado por una BCI, constituye un método de neurorehabilitación del miembro superior sin necesidad de lenguaje ni movimiento. Lo cual es especialmente relevante en pacientes con plejia y paresia severa, ya que el único modo de rehabilitación activa para modular la neuroplasticidad que pueden emplear es la imaginería motora.

Además, proporciona una nueva forma de evaluación más precisa y objetiva, ya que monitorizan en tiempo real la ejecución de cada tarea (fuerza, velocidad, rango de movimiento, etc.), mediante sensores en el exoesqueleto y las señales EEG que recoge la interfaz, lo cual también puede contribuir a mejorar el desempeño de las mismas. Mediante

estos datos el terapeuta puede intervenir en la rehabilitación, ajustando diversos parámetros, como el nivel de dificultad, en función de la recuperación progresiva del paciente.

De igual manera, puede aportar a la rehabilitación actual un mayor número de repeticiones de los movimientos a una velocidad controlada, sin producir una fatiga excesiva.

En futuras investigaciones, resultaría de gran interés estudiar el grupo de pacientes al que más beneficiaría esta tecnología, ya que las muestras actuales son muy heterogéneas. También sería relevante llevar a cabo una evaluación de la efectividad a largo plazo, mediante intervenciones de mayor duración y sesiones de seguimiento tras ciertos periodos de tiempo, contando con grupos control con los que poder comparar los resultados. Además, considero que los movimientos que se llevan a cabo mediante el exoesqueleto son muy limitados, por lo que estimo que sería conveniente aumentarlos en futuros ensayos.

Finalmente, en el artículo de Bundy et al. , se estudió la efectividad de la aplicación de esta técnica en el hogar. El estudio obtuvo resultados muy positivos en cuanto a función del miembro superior y desempeño de AVD. Además la intervención sin supervisión constante supuso una disminución del coste de la terapia, y un incremento en el tiempo de tratamiento y en la flexibilidad de las sesiones. Sin embargo, la muestra fue de diez pacientes, por ello se necesitan más estudios que verifiquen los resultados obtenidos.

CONCLUSIÓN

En la revisión llevada a cabo, se ha tratado de recoger toda la bibliografía referente a la efectividad de los sistemas de exoesqueletos controlados por una BCI en la rehabilitación del miembro superior post-ictus.

Pese a que los resultados reportados en los estudios son positivos en cuanto a la funcionalidad, coordinación y fuerza del miembro superior y al desempeño de las AVD, la efectividad de esta tecnología no ha logrado un alto nivel de evidencia debido a las limitaciones de los estudios presentadas en el apartado anterior.

Referente al grado de implementación del exoesqueleto controlado por una BCI en el ámbito clínico, no se ha encontrado información en ninguno de los artículos revisados.

Para finalizar, se ha tratado de examinar las ventajas que presenta el uso del exoesqueleto controlado por una BCI respecto a la terapia convencional. No se han encontrado artículos que comparen la efectividad de esta tecnología frente a la terapia convencional, por ello, no es posible establecer si presenta mejoras. Sin embargo, se estima que lo más adecuado es emplear ambos métodos de manera conjunta.

BIBLIOGRAFÍA:

1. Alkadhi B, Al-Wabil A. Behavioral Archetypes for Stroke Rehabilitation Technologies. En: Stephanidis C, editor. HCI International 2018 – Posters' Extended Abstracts [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2018 [citado 3 de julio de 2019]. p. 10-6. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-92279-9_2
2. Aggogeri F, Mikolajczyk T, O’Kane J. Robotics for rehabilitation of hand movement in stroke survivors. *Advances in Mechanical Engineering*. abril de 2019;11(4):168781401984192.
3. Hortal E, Planelles D, Resquin F, Climent JM, Azorín JM, Pons JL. Using a brain-machine interface to control a hybrid upper limb exoskeleton during rehabilitation of patients with neurological conditions. *J NeuroEngineering Rehabil*. diciembre de 2015;12(1):92.
4. Chowdhury A, Meena YK, Raza H, Bhushan B, Uttam AK, Pandey N, et al. Active Physical Practice Followed by Mental Practice Using BCI-Driven Hand Exoskeleton: A Pilot Trial for Clinical Effectiveness and Usability. *IEEE J Biomed Health Inform*. noviembre de 2018;22(6):1786-95.
5. Zhang K, Chen X, Liu F, Tang H, Wang J, Wen W. System Framework of Robotics in Upper Limb Rehabilitation on Poststroke Motor Recovery. *Behavioural Neurology*. 2018:1-
6. Resquin F, Ibanez J, Gonzalez-Vargas J, Brunetti F, Dimbwadyo I, Alves S, et al. Combining a hybrid robotic system with a brain-machine interface for the rehabilitation of reaching movements: A case study with a stroke patient. En: 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) [Internet]. Orlando, FL, USA: IEEE; 2016 [citado 3 de julio de 2019]. p. 6381-Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7592188/>
7. Legg L, Drummond A, Leonardi-Bee J, Gladman JRF, Corr S, Donkervoort M, et al. Occupational therapy for patients with problems in personal activities of daily living after

stroke: systematic review of randomised trials. *BMJ*. 3 de noviembre de 2007;335(7626):922.

8. Pérez de Heredia Torres M, Cuadrado Pérez ML. Terapia ocupacional en Neurología. *RevNeurol*. 2002;35(04):366.

9. Polonio López B, Romero Ayuso DM. Terapia Ocupacional aplicada al Daño Cerebral Adquirido: Colección Terapia Ocupacional. Madrid: Ed. Médica Panamericana; 2010

10. Barbuto S, Stein J. Rehabilitation Robotics for Stroke. En: *Stroke Rehabilitation* [Internet]. Elsevier; 2019 [citado 3 de julio de 2019]. p. 235-47. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323553810000172>

11. Frisoli A, Solazzi M, Loconsole C, Barsotti M. New generation emerging technologies for neurorehabilitation and motor assistance. : 4.

12. Ruiz-Olaya AF, Lopez-Delis A, da Rocha AF. Upper and Lower Extremity Exoskeletons. En: *Handbook of Biomechatronics* [Internet]. Elsevier; 2019 [citado 3 de julio de 2019]. p. 283-317. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128125397000118>

13. Wang Q, Lan Z. The application prospect of fuel cell for the rehabilitation aids. *International Journal of Hydrogen Energy*. septiembre de 2016;41(35):15777-82

14. Gassert R, Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. *J NeuroEngineering Rehabil*. diciembre de 2018;15(1):46.

15. Slutzky M. Brain machine interfaces: state of the art and challenges to translation. *NoD*. 2015; 83: 152-153. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nbd.2015.06.009>

16. Padfield N, Zabalza J, Zhao H, Masero V, Ren J. EEG-Based Brain-Computer Interfaces Using Motor-Imagery: Techniques and Challenges. *Sensors*. 22 de marzo de 2019;19(6):1423.

17. López-Larraz E, Sarasola-Sanz A, Irastorza-Landa N, Birbaumer N, Ramos-Murguialday A. Brain-machine interfaces for rehabilitation in stroke: A review. Harvey RL, editor. *NRE*. 24 de julio de 2018;43(1):77-97.

18. Frolov AA, Bobrov PD. Brain-Computer Interfaces: Neurophysiological Bases and

Clinical Applications. *Neurosci Behav Physi.* noviembre de 2018;48(9):1033-40.

19. Jochumsen M, Cremoux S, Robinault L, Lauber J, Arceo J, Navid M, et al. Investigation of Optimal Afferent Feedback Modality for Inducing Neural Plasticity with A Self-Paced Brain-Computer Interface. *Sensors.* 3 de noviembre de 2018; 18(11):3761.

20. Suwannarat A, Pan-ngum S, Israsena P. Comparison of EEG measurement of upper limb movement in motor imagery training system. *BioMed Eng OnLine.* diciembre de 2018;17(1):103.

21. Hortal E. *Emerging therapies in neurorehabilitation.* New York: Springer; 2013.

22. Mokienko OA, Lyukmanov RKh, Chernikova LA, Suponeva NA, Piradov MA, Frolov AA. Brain-computer interface: The first experience of clinical use in Russia. *Hum Physiol.* 2016; 42(1):24-31.

23. Kotov SV, Turbina LG, Bobrov PD, Frolov AA, Pavlova OG, Kurganskaya ME, et al. Rehabilitation of Stroke Patients with a Bioengineered “Brain-Computer Interface with Exoskeleton” System. *Neurosci Behav Physi.* 2016;46(5):518-22.

24. Bundy DT, Souders L, Baranyai K, Leonard L, Schalk G, Coker R, et al. Contralesional Brain-Computer Interface Control of a Powered Exoskeleton for Motor Recovery in Chronic Stroke Survivors. *Stroke.* 2017;48(7):1908-15.

25. Frolov AA, Mokienko O, Lyukmanov R, Biryukova E, Kotov S, Turbina L, et al. Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial. *Front Neurosci.* 2017; 11:400.

26. Kotov SV, Turbina LG, Kondur AA, Zaytseva EV, Biryukova EV. Recovery Dynamics in Patients with Poststroke Motor Disorders after Multiple Courses of Neurorehabilitation Using an Exoskeleton Controlled by a Brain-Computer Interface. *Neurosci Behav Physi.* 2018;48(9):1088-92.

- 27.** Frolov AA, Kozlovskaya IB, Biryukova EV, Bobrov PD. Use of Robotic Devices in Post-Stroke Rehabilitation. *Neurosci Behav Physi.* 2018;48(9):1053-66.
- 28.** Ivanova GE, Bushkova YuV, Suvorov AYu, Stahovskaya LV, Dzhalagiya IZ, Varako NA, et al. Use of a BCI-Exoskeleton Simulator with Multichannel Biofeedback in a Multidisciplinary Rehabilitation Program in Poststroke Patients. *Neurosci Behav Physi.* 2018;48(9):1100-5.
- 29.** Rathee D, Chowdhury A, Meena YK, Dutta A, McDonough S, Prasad G. Brain–Machine Interface-Driven Post-Stroke Upper-Limb Functional Recovery Correlates With Beta-Band Mediated Cortical Networks. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2019;27(5):1020-31.

