

Diseño y desarrollo de un dispositivo de estimulación eléctrica funcional para  
rehabilitación de mano controlado por una interfaz cerebro-computadora

Edwar Julian Ardila Velandia y Sley Yurrely Ávila Calderón

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director

Jorge Eduardo Quintero Muñoz

Especialista en Telecomunicaciones

Codirector

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Magister en Electrónica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Dedicado a cada uno de los integrantes de mi familia en especial a mi mamá Rocío Calderon y a mi papá Héctor Ávila porque a pesar de las dificultades estuvieron siempre apoyándome e impulsándome para sacar este proyecto adelante, a cada uno de los compañeros de estudio que respondieron a alguna duda cuando les necesite, gracias a mi grupo universitario por siempre ayudarme y sacarme una sonrisa cada vez que lo necesite.

**Sley Yurrely Ávila Calderón.**

A mis padres, por su amor incondicional y su apoyo constante, que han sido la fuerza que me impulsa a alcanzar mis sueños. A mis compañeros, por los momentos compartidos y el trabajo en equipo que nos ha llevado hasta aquí. Y a mi novia, por su paciencia, motivación y por estar a mi lado en cada paso de este camino. Gracias a todos por ser parte fundamental de este logro.

**Edwar Julian Ardila Velandia**

## Tabla de contenido

|                                                                                 | <b>Pág.</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Introducción .....                                                              | 8           |
| 1      Objetivos .....                                                          | 9           |
| 1.1    Objetivo general.....                                                    | 9           |
| 1.2    Objetivos específicos .....                                              | 9           |
| 2      Marco teórico .....                                                      | 10          |
| 2.1    Causas de la mano parética .....                                         | 10          |
| 2.2    Accidentes cerebrovasculares (ACV) .....                                 | 11          |
| 2.2.1   Estadísticas ACV a nivel mundial.....                                   | 11          |
| 2.2.2   Estadísticas ACV en Colombia .....                                      | 11          |
| 2.2.3   Rehabilitación post-ACV .....                                           | 12          |
| 2.3    Anatomía de la mano .....                                                | 12          |
| 2.3.1   Sistema óseo de la mano .....                                           | 12          |
| 2.3.2   Sistema nervioso de la mano .....                                       | 13          |
| 2.3.3   Sistema muscular de la mano .....                                       | 14          |
| 2.4    Tratamientos .....                                                       | 16          |
| 2.4.1   Movimiento pasivo continuo.....                                         | 16          |
| 2.4.2   Exoesqueleto .....                                                      | 16          |
| 2.5    Estimulación eléctrica funcional – FES .....                             | 17          |
| 2.5.1   Aplicaciones clínicas de las neuroprótesis FES en miembro superior..... | 18          |
| 2.5.2   Tecnologías de control en neuroprótesis FES para miembro superior.....  | 18          |
| 2.5.3   Dispositivo FES comerciales .....                                       | 19          |

|       |                                                     |    |
|-------|-----------------------------------------------------|----|
| 2.6   | Neuroplasticidad cerebral .....                     | 21 |
| 2.6.1 | Neuroplasticidad funcional .....                    | 22 |
| 2.6.2 | Neuroplasticidad estructural.....                   | 22 |
| 2.6.3 | Neuroplasticidad molecular.....                     | 22 |
| 2.6.4 | Neuroplasticidad en la recuperación de un ACV ..... | 22 |
| 2.7   | Señales electroencefalográficas .....               | 23 |
| 2.8   | Ingeniería de rehabilitación.....                   | 24 |
| 3     | Diseño FES – BCI.....                               | 25 |
| 3.1   | Parámetros de la señal eléctrica .....              | 25 |
| 3.1.1 | Forma de onda.....                                  | 25 |
| 3.1.2 | Voltaje y corriente.....                            | 26 |
| 3.1.3 | Ancho de pulso.....                                 | 26 |
| 3.1.4 | Frecuencia .....                                    | 26 |
| 3.2   | Parámetros de diseño del FES-BCI.....               | 26 |
| 3.2.1 | Voltaje y corriente.....                            | 26 |
| 3.2.2 | Ancho de pulso.....                                 | 27 |
| 3.2.3 | Frecuencia .....                                    | 27 |
| 3.2.4 | Forma de onda.....                                  | 27 |
| 3.2.5 | Colocación de los electrodos.....                   | 27 |
| 3.3   | Diadema y módulo TGAM.....                          | 28 |
| 3.4   | Diagrama de bloques del sistema FES-BCI.....        | 29 |
| 3.5   | Circuito electrónico FES.....                       | 29 |
| 3.5.1 | Alimentación .....                                  | 29 |

|       |                                     |    |
|-------|-------------------------------------|----|
| 3.5.2 | Microcontrolador.....               | 30 |
| 3.5.3 | Generación de la onda .....         | 30 |
| 3.5.4 | Push-pull.....                      | 31 |
| 3.5.5 | Elevador de tensión .....           | 32 |
| 3.6   | PBC .....                           | 32 |
| 3.7   | Carcasa 3D .....                    | 33 |
| 3.8   | Software de aprendizaje .....       | 33 |
| 4     | Resultados .....                    | 34 |
| 4.1   | Diadema .....                       | 34 |
| 4.2   | Tarjeta electrónica.....            | 35 |
| 4.3   | Programa del microcontrolador ..... | 35 |
| 4.4   | Carcasa 3D .....                    | 36 |
| 4.5   | Costos.....                         | 36 |
| 5     | Validación del Sistema .....        | 37 |
| 5.1   | Ton Mín. ....                       | 37 |
| 5.2   | Ton Máx.....                        | 38 |
| 5.3   | F Mín.....                          | 38 |
| 5.4   | F Máx.....                          | 39 |
| 5.5   | Eficacia de la diadema .....        | 39 |
| 6     | Conclusiones .....                  | 40 |
| 7     | Recomendaciones .....               | 41 |
|       | Referencias.....                    | 43 |

## Resumen

**Título:** Diseño y desarrollo de un dispositivo de estimulación eléctrica funcional para rehabilitación de mano controlado por una interfaz cerebro-computadora. \*

**Autores:** Edwar Julián Ardila Velandia y Sley Yurrely Ávila Calderon. \*\*

**Palabras claves:** FES, BCI, Neuroplasticidad, Rehabilitación.

**Descripción:** Este estudio aborda el problema de la mano parética, una condición que afecta la funcionalidad debido a problemas en los nervios como consecuencia de un ACV. El propósito es diseñar un dispositivo de estimulación eléctrica funcional de bajo costo, controlado por una interfaz cerebro-computadora, que estimule la neurorrehabilitación. La investigación se centra en desarrollar una herramienta accesible que permita a los usuarios recuperar la capacidad de agarrar objetos y fortalecer los músculos involucrados. El proyecto utiliza una diadema que capta señales de electroencefalografía y las convierte en impulsos eléctricos. Los hallazgos destacan que este dispositivo podría reducir la necesidad de múltiples sesiones de fisioterapia, proporcionando una alternativa económica y efectiva a los tratamientos actuales. Las implicaciones para la ingeniería de rehabilitación son significativas, ya que podría mejorar la accesibilidad y eficacia de los tratamientos para personas con movilidad reducida en las manos

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Especialista en Telecomunicaciones Jorge Eduardo Quintero Muñoz. Codirector: Magister en Potencia Eléctrica Jaime Guillermo Barrero Pérez

## **Abstract**

**Title:** Design and Development of a Functional Electrical Stimulation Device for Hand Rehabilitation Controlled by a Brain-Computer Interface. \*

**Authors:** Edwar Julian Ardila Velandia and Sley Yurrely Ávila Calderon. \*\*

**Keywords:** FES, BCI, Neuroplasticity, Rehabilitation

**Description:** This study addresses the problem of paretic hand, a condition that affects functionality due to nerve problems as a result of a stroke. The purpose is to design a low-cost functional electrical stimulation device, controlled by a brain-computer interface, that stimulates neurorehabilitation. The research focuses on developing an accessible tool that allows users to regain the ability to grasp objects and strengthen the muscles involved. The project uses a headband that captures electroencephalography signals and converts them into electrical impulses. The findings highlight that this device could reduce the need for multiple physiotherapy sessions, providing an economical and effective alternative to current treatments. The implications for rehabilitation engineering are significant, as it could improve the accessibility and effectiveness of treatments for people with reduced hand mobility.

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Especialista en Telecomunicaciones Jorge Eduardo Quintero Muñoz. Codirector: Magister en Potencia Eléctrica Jaime Guillermo Barrero Pérez.

## **Introducción**

Las manos son una herramienta fundamental para el ser humano, estas permiten interactuar con el entorno, son capaces de realizar una variedad de funciones como agarrar objetos, sentir, manipular, etc., y por su anatomía, han permitido el desarrollo tecnológico de la humanidad. La pérdida de movilidad en las manos es una patología que con el tiempo dificulta el movimiento de los dedos haciendo que estos vayan perdiendo fuerza lo que a su vez limita la funcionalidad, esta puede producirse en una o ambas manos y ocurre por afecciones de uno o varios nervios en el brazo y la muñeca, así como el deterioro de los músculos implicados.

Actualmente dentro de los tratamientos para el entumecimiento de las manos se tienen pocos dispositivos electromédicos y los existentes son de costo elevado haciendo que una persona con dicho padecimiento no pueda adquirirlos para recibir tratamiento en casa. Si se desea recibir los tratamientos fuera de casa es necesario contactar con centros de fisioterapia especializados lo que incrementa a lo largo el costo del tratamiento y reduce la intensidad y frecuencia con la que se pueden realizar. Otras alternativas como emplear medicamentos solo se enfocan en aliviar los dolores asociados y no en rehabilitar la funcionalidad de la mano.

El presente trabajo busca diseñar y documentar el desarrollo de un dispositivo de estimulación eléctrica funcional de bajo costo para para rehabilitación de mano controlado por una interfaz cerebro computadora haciendo uso de una diadema que capta las señales de electroencefalografía y que se traduce en impulsos eléctricos, este dispositivo permitirá recuperar una función básica de la mano como lo es agarrar objetos y a su vez fortalecer los músculos implicados en dicha función.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Diseñar y desarrollar un dispositivo de estimulación eléctrica funcional para rehabilitación de mano controlado por una interfaz cerebro – computadora.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Determinar y transmitir inalámbricamente la señal de control de la interfaz cerebro – computadora a la neuroprótesis a construir
- Diseñar el dispositivo de estimulación eléctrica funcional acorde a las especificaciones técnicas
- Construir el dispositivo para la rehabilitación de mano que sea de bajo costo y fácil manejo para los usuarios
- Validar en laboratorio el correcto funcionamiento del sistema de rehabilitación con su interfaz cerebro – computadora

## 2 Marco teórico

### 2.1 Causas de la mano parética

La paresia de la mano es una disminución parcial de la fuerza o debilidad en los músculos de la mano, lo que puede afectar la capacidad de mover la mano o realizar tareas que requieren destreza. La paresia no es una parálisis completa, ya que en la paresia aún puede haber algo de un movimiento en la mano afectada, aunque esté limitado o debilitado. Las causas de la paresia de la mano pueden incluir:

- Accidentes cerebrovasculares (ACV): Un ACV puede dañar las áreas del cerebro responsables del control motor, lo que resulta en debilidad en una extremidad.
- Lesiones nerviosas periféricas: Daños en los nervios que controlan los músculos de la mano, como el nervio radial, mediano o cubital, síndrome del túnel carpiano, entre otros.
- Trastornos neurológicos: Enfermedades como la esclerosis múltiple, la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) o la neuropatía periférica pueden causar debilidad en la mano.
- Traumatismo: Lesiones directas a la mano o a los nervios que la controlan debido a accidentes, caídas o cirugías.
- Infecciones: Algunas infecciones que afectan el sistema nervioso pueden causar debilidad en la mano.
- Problemas musculares: Miopatías o enfermedades musculares que afectan la fuerza y el funcionamiento de los músculos

El tratamiento de la paresia de la mano depende de la causa subyacente e incluye fisioterapia, terapia ocupacional, medicamentos y en algunos casos, cirugía. (Clínica Uner, 2023)

## 2.2 Accidentes cerebrovasculares (ACV)

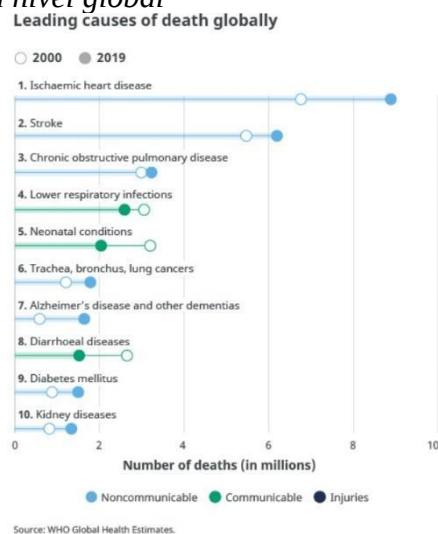
Según la American Stroke Association un ACV es un bloqueo en el flujo de sangre en las arterias del cerebro o cuando se presenta un sangrado en el cerebro, lo que provoca la muerte de las células cerebrales y un daño al sistema nervioso. (American Stroke Association, 2024)

### 2.2.1 Estadísticas ACV a nivel mundial

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) las enfermedades cerebrovasculares son la segunda causa de mortalidad, de las cuales el ACV representa aproximadamente el 11% de las muertes en el mundo. (World Health Organization, 2020)

**Figura 1**

*Principales causas de muerte a nivel global*



Nota. Top 10 principales causas de muerte a nivel global. Tomado de la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2020)

### 2.2.2 Estadísticas ACV en Colombia

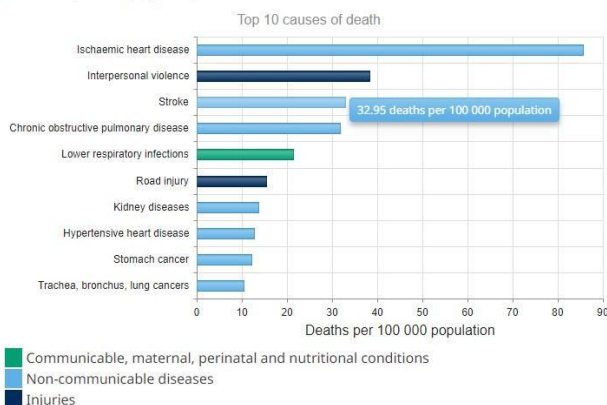
Según la OMS, las muertes por ACV representaron 6,6% del total de muertes en Colombia en el 2019, en donde se destaca que la ciudad con el mayor índice es Bogotá. Según el DANE, en el 2022 el ACV fue la segunda causa de mortalidad. (World Health Organization, 2020)

**Figura 2*****Principales causas de muerte en Colombia***

Top 10 causes of death in Colombia for both sexes aged all ages (2019)

[Hide filters](#) | [Top-10 deaths](#) | [Top-10 DALYs](#) | [Underlying data](#) | [Download with OData API](#)

Filters

Country  
ColombiaYear  
2019Sex  
Both sexesAge group  
All ages

Nota. Por cada 100.000 personas hay en promedio 32 muertes. Tomado de OMS (World Health Organization, 2020)

**2.2.3 Rehabilitación post-ACV**

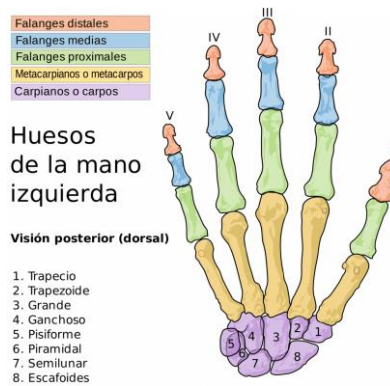
Se estima que dos tercios de los pacientes que han sufrido un ACV presentan secuelas que afectarán la independencia y calidad de vida, por lo que para su rehabilitación se debe incluir un equipo multidisciplinario, para la rehabilitación de miembros superiores se sugiere el uso de técnicas manuales y de fisioterapia (FES), parte de la recuperación se atribuye a la neuroplasticidad (Sánchez, 2023).

**2.3 Anatomía de la mano**

La anatomía de la mano tiene la capacidad para manipular herramientas, lo que ha permitido el desarrollo de la cultura y la civilización humana.

**2.3.1 Sistema óseo de la mano**

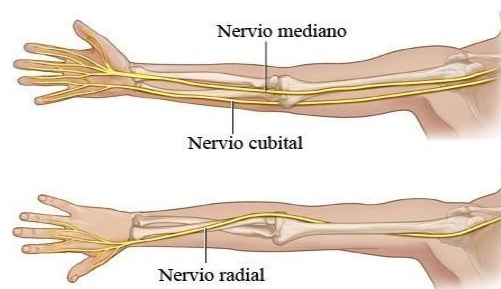
La mano está compuesta por los huesos de la muñeca, los metacarpianos y las falanges, que están conectados por articulaciones, ligamentos y tendones. Además, contienen músculos, nervios y vasos sanguíneos que permiten el movimiento, la sensibilidad y la circulación. (Curiosoando, 2017)

**Figura 3***Huesos de la mano*

Nota. Se presentan los huesos que conforman la mano, su clasificación y sus respectivos nombres. Tomado de curioseando (Curiosoando, 2017)

**2.3.2 Sistema nervioso de la mano**

El movimiento de la mano está controlado por los nervios mediano, cubital y radial. El nervio mediano proporciona sensibilidad a los dedos pulgar, índice, medio y parte del anular, se encarga de mover los músculos de la muñeca y los dedos. El nervio cubital controla ciertos músculos pequeños de la mano que ayudan con los movimientos motores finos y proporciona sensibilidad al dedo meñique y la mitad del dedo anular. El nervio radial ordena la extensión de los músculos de la muñeca y los dedos, proporciona sensibilidad al dorso de la mano y el antebrazo. (todocuerpohumano.com, 2024)

**Figura 4***Nervios de la mano*

Nota. Ubicación de los nervios que controlan la mano. Tomado de El Cuerpo Humano (todocuerpohumano.com, 2024)

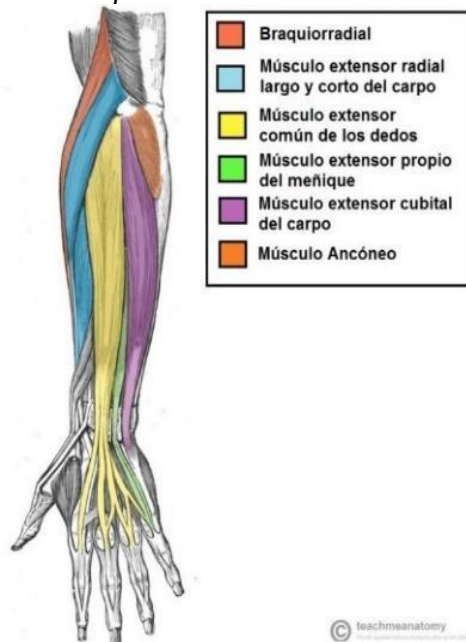
### 2.3.3 Sistema muscular de la mano

Los músculos implicados en el movimiento de la mano incluyen: flexores y extensores de los dedos, los músculos interóseos controlan la movilidad entre los huesos de los dedos, los músculos de la muñeca como el músculo extensor largo del radio y el músculo flexor largo del pulgar, entre otros.

**2.3.3.1 Músculos que intervienen en la apertura de la mano.** Los músculos involucrados en la acción de abrir la mano (es decir, extensión) son responsables de enderezar los dedos y el pulgar lejos de la palma. Los principales implicados en la extensión de la mano son:

**Figura 5**

*Músculos implicados en la acción de apertura de la mano*



Nota. Se resaltan los músculos que permiten la extensión de la mano. tomado de realidad fitness (realidadfitness, 2024)

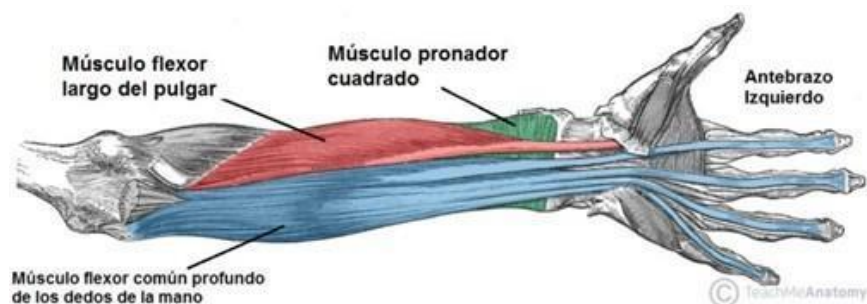
- Extensor común de los dedos: se encarga de la extensión de la muñeca y de los dedos índice, corazón, anular, meñique (dedos 2 a 5, respectivamente)

- Extensor propio el quinto dedo: se encarga de la extensión del dedo pulgar, también ayuda en la extensión de la muñeca.
- Extensor corto y largo del pulgar: se encarga de la extensión de las articulaciones metacarpofalángica y carpometacarpiana del pulgar.
- Extensor del índice: permite la extensión independiente del dedo índice.

**2.3.3.2 Músculos que intervienen en el cierre de la mano.** Los músculos implicados en la acción de cerrar la mano (es decir, la flexión) se encuentran en el antebrazo y son los encargados de tirar de los dedos y el pulgar hacia la palma. Los principales músculos involucrados en la flexión de la mano son:

**Figura 6**

*Músculos implicados en la acción de cierre de la mano*



Nota. Se resaltan los músculos que permiten la flexión de la mano. tomado de realidad fitness (realidadfitness, 2024)

- Músculo flexor superficial de los dedos: se encarga de la flexión, principalmente de la muñeca y de las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas proximales, de los dedos 2 a 5.
- Músculo flexor largo del pulgar: Flexiona las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas del dedo pulgar.

- Músculo flexor profundo de los dedos: cumple con flexionar la muñeca, así como la flexión de las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas proximales y distal de los dedos 2 a 5.

## 2.4 Tratamientos

### 2.4.1 *Movimiento pasivo continuo*

El movimiento pasivo continuo (MPC) es la flexión repetitiva de la extremidad afectada en la cual las articulaciones se mueven de forma mecánica mediante un grado de rango de movimiento (ROM) establecido. Estos ejercicios se realizan por medio de un agente externo, ya sea un dispositivo motorizado o un fisioterapeuta, lo que indica que el paciente no hace ningún esfuerzo. Algunas de las ventajas identificadas en esta terapia son: la reducción del dolor y el aumento de la amplitud del movimiento. (Centro de Especialidades Ortopédicas, 2022)

**Figura 7**

*Movimiento pasivo continuo*



*Nota.* Tomado de Enovis (Enovis, 2024)

### 2.4.2 *Exoesqueleto*

Los exoesqueletos son dispositivos electrónicos y automatizados para terapias de rehabilitación de mano que se desarrollan mediante diferentes técnicas entre las cuales se encuentra: el movimiento pasivo continuo MPC explicado anteriormente; técnicas de

electromiografía en las cuales se envían señales del cerebro producidas por un músculo que hacen que este se relaje. Algunos de estos dispositivos cuentan con una interfaz con múltiples actividades y juegos para que el paciente pueda realizar la terapia de forma más dinámica, como es el caso del exoesqueleto robótico The Hand Of Hope:

**Figura 8**

*Exoesqueleto Hand of Hope*



Nota. Exoesqueleto comercial que emplea electromiografía y que se usa en recuperación de ACV. Tomado de Movex Clinics (Rehab-Robotics, 2024)

## **2.5 Estimulación eléctrica funcional – FES**

Se define como la aplicación de estímulos eléctricos a nivel neuromuscular para provocar una contracción muscular artificial y restaurar o realizar una función perdida. Las corrientes utilizadas para FES consisten en trenes de impulsos eléctricos para provocar una contracción tetánica del músculo que le permita realizar una función. Se usan frecuencias entre 20 y 40 Hz, con una anchura de 100 y 500 microsegundos. Si usamos frecuencias superiores a 50 Hz se provoca contracción tetánica de fibras rápidas tipo II, produciendo fatiga muscular precoz. Parece que el uso de una frecuencia modulada variable entre 20 y 40 Hz en vez de fija mejora el rendimiento y disminuye la fatiga muscular. (rhnneuromad, 2017)

### ***2.5.1 Aplicaciones clínicas de las neuroprótesis FES en miembro superior***

Los dos usos comunes de Fes son reemplazar la función (es decir, como dispositivo ortopédico) y reentrenar la función (es decir, como dispositivo terapéutico) (Kapadia, Moineau, & Popovic, 2020). Una de las aplicaciones más comunes es la rehabilitación de la función de la extremidad superior en personas con lesiones medulares. Estudios han demostrado que las FES pueden mejorar la función de agarre y presión en pacientes con paraplejia (Popovic, 2020). Además de las lesiones medulares, la FES también se ha utilizado en la rehabilitación de pacientes con hemiparesia debido a accidentes cerebrovasculares. (J. Eraifej, 2017)

### ***2.5.2 Tecnologías de control en neuroprótesis FES para miembro superior***

Podemos clasificar los dispositivos FES para miembros superiores según el método de control de la estimulación. El control de la neuroprótesis es un aspecto para lograr una rehabilitación efectiva y restaurar la función motora del paciente. Entre las técnicas empleadas para el control de la neuroprótesis están:

**2.5.2.1 Control manual o interruptores.** En esta técnica se busca que el paciente o un terapeuta, a partir de una secuencia fija preprogramada y de estimulaciones cronometradas, puedan activar o desactivar la estimulación en momentos específicos (G. E. Mann, 2005). Estos dispositivos son empleados sobre todo en ejercicios pasivos, algunos dispositivos son el kit estimulador MicroStim de 2 canales, el Odstock Medical cuenta con 4 canales y el Bioness H200 que cuenta con 5 canales (G. Snoek, 2000).

**2.5.2.2 Control por señales de electromiografía (EMG).** La activación de la estimulación eléctrica funcional por medio de señales EMG se presentan cuando se registra una actividad eléctrica de los músculos cercanos a la zona afectada. Estas señales EMG se usan para detectar la intención de movimiento.

**2.5.2.3 Interfaz cerebro máquina (BCI).** A diferencia de la activación por señales electromiográficas, la interfaz BCI utiliza la activación por medio de la señales cerebrales o electroencefalográficas EEG. Mediante la detección de patrones cerebrales asociados a la acción de movimiento se logran controlar los músculos afectados. A pesar de que existen electrodos EEG implantados en el cerebro, la mayoría de los sistemas usan electrodos no invasivos. En el estudio se usó un solo electrodo EEG para usar la interfaz BCI, por medio de un módulo CV de detectar el objeto a mover y se seleccionó el tipo de agarre y así poder elegir la señal de activación, estudio que se realizó con 5 pacientes en estado neurológicamente intactos y un paciente LCM cervical, como resultado se obtuvo una clasificación en el módulo del 90,8%. (J. Likitlersuang, 2018)

**2.5.2.4 Control basado en patrones de movimiento.** Existen sistemas que emplean sensores de movimiento como acelerómetros o giroscopios para detectar patrones de movimiento del paciente. Estos sensores registran el movimiento y la posición de la extremidad afectada, permitiendo ajustar la estimulación eléctrica para facilitar movimientos específicos. Entorno a este tema, se han realizado numerosos estudios, en uno de ellos, los autores investigaron la viabilidad de utilizar estimulación eléctrica controlada por acelerómetro para los extensores del codo, la muñeca y los dedos para permitir la práctica de tareas funcionales en pacientes con hemiparesia crónica. Los resultados demostraron mejoras significativas en las puntuaciones de deterioro, función y calidad de vida durante el período de tratamiento de 12 semanas. (G. Mann, 2011)

### **2.5.3 Dispositivo FES comerciales**

**2.5.3.1 Bioness H200.** Es un sistema inalámbrico de rehabilitación de mano que permite recuperar la funcionalidad, está conformado por 2 partes, un soporte de estimulación funcional (ortesis) y la unidad de control (microprocesador). Se diseñó con el fin de aumentar la función de la mano, aumentar o mantener el rango de movimiento, reducir espasmos, prevenir la pérdida

muscular, reeducar los músculos y aumentar la circulación sanguínea. El sistema aplica estimulación eléctrica a través de una secuencia precisa, estimulando los nervios y músculos apropiados del antebrazo y la mano.

### Figura 9

*Bioness H200*



Nota. Sistema de rehabilitación inalámbrica H200 fabricado por Bioness. Tomado de BIONESS(<https://www.bioness.com/Products.php>)

**2.5.3.2H1 Hand Rehab System.** Es un sistema de electroestimulación que combina biorretroalimentación sEMG, Pas y electrodos integrados, se diseñó con el fin de aumentar la función de la mano, reducir espasmos musculares, retardar la atrofia muscular, reeducar los músculos y aumentar la circulación sanguínea. El dispositivo cuenta con una pulsera ajustable y electrodos de acero inoxidable, esta es capaz de detectar los comandos enviados por el cerebro (señales sEMG) y a su vez generar el estímulo eléctrico para realizar el movimiento de la mano.

**Figura 10***H1 Hand Rehab System*

Nota. Sistema de rehabilitación H1 Hand Rehab System, emplea señales electromiográficas. Tomado de XFT([https://www.xft-china.com/english/Products/H1\\_Hand\\_Rehab\\_System\\_XFT\\_2003E/2017/0710/194.html](https://www.xft-china.com/english/Products/H1_Hand_Rehab_System_XFT_2003E/2017/0710/194.html))

**2.5.3.3 Fesia Grasp.** El dispositivo Fesia basa su funcionamiento en estimulación eléctrica funcional de los músculos del antebrazo proporcionando flexión y extensión de la muñeca y los dedos. Consta de un electrodo multicampo que mejora la selección de los movimientos. Cuenta con una aplicación software que permite controlar los parámetros de estimulación y así poder supervisar la evolución de los pacientes.

**Figura 11***Fesia Grasp*

Nota. Tomado de fysioline(<https://shop.fysioline.fi/tuote/fesia-grasp-clinical-kit/>)

## 2.6 Neuroplasticidad cerebral

La neuroplasticidad es la capacidad del sistema nervioso de reorganizar su estructura, funciones o conexiones después de una lesión (Guadamuz Delgado, Miranda Saavedra, & Mora Miranda, 2022). La neuroplasticidad se manifiesta en varios niveles, desde cambios moleculares

y celulares hasta alteraciones en la estructura y función del cerebro. Existen dos tipos principales de neuroplasticidad:

### **2.6.1 *Neuroplasticidad funcional***

Ocurre cuando el cerebro se adapta a una función perdida o dañada, reasignando tareas a áreas intactas. Esto es común en la recuperación de lesiones cerebrales, como después de un accidente cerebrovascular. (Hernández-Muela, 2004)

### **2.6.2 *Neuroplasticidad estructural***

La neuroplasticidad estructural hace referencia a los mecanismos que existen en nuestro cerebro que nos permiten ser flexibles, reforzar las redes que ya existen y formar nuevas redes neuronales e incluso eliminarlas. (Consuelo Doddoli, UNAM, 2022)

### **2.6.3 *Neuroplasticidad molecular***

Se da a nivel bioquímico y hace referencia a los cambios de las moléculas químicas que actúan en la sinapsis buscando remodelar las conexiones, esta ocurre a corto o largo plazo y según su uso y relevancia fortalece o debilita las conexiones para lograr su fin. (Pulido, 2023)

### **2.6.4 *Neuroplasticidad en la recuperación de un ACV***

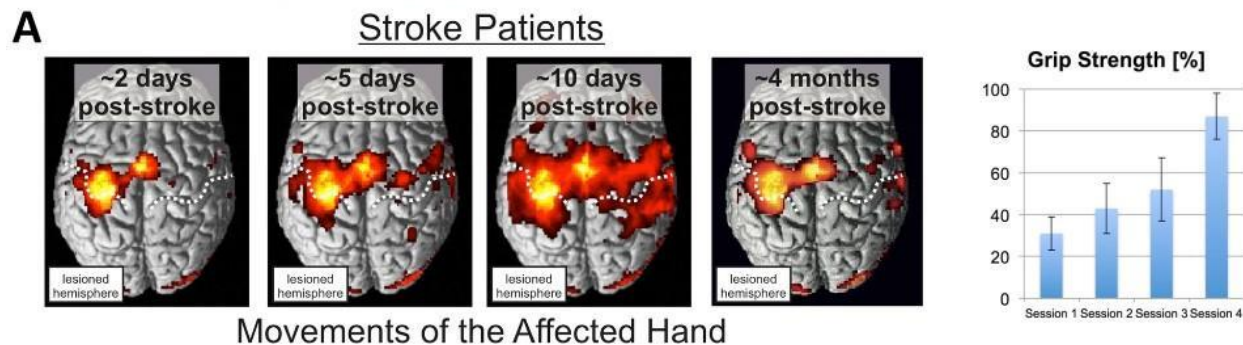
Después de un ACV la neuroplasticidad funciona de manera diferente, la recuperación también es diferente, la experiencia y el aprendizaje son importantes, por lo que si se desea activar la neuroplasticidad se requiere práctica constante. (Flint Rehab, 2024)

Se tiene la regla de recuperación proporcional, la cual nos dice que los pacientes pueden mejorar en promedio un 70% (+/- 15%) de la función perdida dentro de los 3 a 6 meses posteriores al ACV. En la figura 12, se puede apreciar un mapa de actividad de resonancia magnética funcional en donde se puede apreciar la reorganización de la red motora de un paciente de ACV que presenta

mano parética, podemos observar los cambios en la actividad cerebral conforme se realizan las sesiones de rehabilitación, teniendo un incremento en la fuerza del agarre. (Grefkes, 2020)

**Figura 12**

*Mapas de actividad funcional magnetic resonance imaging*



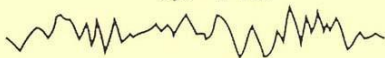
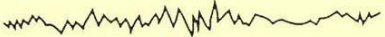
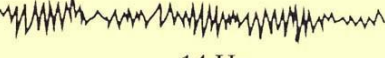
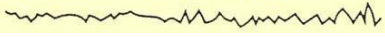
**2.6.4.1 Técnicas para promover la neuroplasticidad.** Estos son algunas de las técnicas que permiten crear un entorno enriquecido con estimulación sensorial, motora y cognitiva, claves para una buena recuperación (The Stroke Foundation, 2024):

- Fisioterapia
- Técnicas de neuroestimulación, estimulación eléctrica
- Entrenamiento cognitivo
- Generación y repetición de nuevos movimientos

## 2.7 Señales electroencefalográficas

Para obtener las señales electroencefalográficas (EEG), se emplean electrodos en forma de discos de metal, estos miden potenciales eléctricos los cuales se producen por la comunicación de las neuronas. Los ritmos cerebrales se definen como ondas regulares a través del tiempo, y para diferenciarlos se han dividido según la banda de frecuencia que ocupan. (hipnosisterapeuticaregresiva, 2016)

**Figura 13***Ondas cerebrales*

| Ondas cerebrales | Frecuencia                                                                        | Estado mental       |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
|                  | 0,5 - 3 Hz                                                                        |                     |
| Onda delta       |  | sueño profundo      |
|                  | 4 - 7 Hz                                                                          |                     |
| Onda theta       |  | sueño ligero        |
|                  | 8 - 13 Hz                                                                         |                     |
| Onda alfa        |  | despierto, relajado |
|                  | 14 Hz                                                                             |                     |
| Onda beta        |  | despierto, excitado |

Nota. Ondas que se presentan en los diferentes estados del cerebro. Tomado de HIPNOSIS (hipnosisterapeuticaregresiva, 2016)

**Ritmo delta ( $\delta$ ):** La banda de frecuencia típica se encuentra entre 0,5 y 3,5 Hz y presenta amplitudes de 20 a 200  $\mu$ V. Se encuentra presente durante el sueño profundo.

**Ritmo theta ( $\theta$ ):** la banda de frecuencia está presente entre 4 y 7 Hz y se manifiesta en amplitudes de 20 a 100  $\mu$ V. Se detecta cuando una persona está en estado de adormecimiento y sueño.

**Ritmo alfa( $\alpha$ ):** la banda de frecuencia está entre 8 y 13 Hz y corresponde a amplitudes de 20 a 60  $\mu$ V. Se detecta cuando una persona se encuentra en reposo visual, despierto, pero con un estado mental tranquilo.

**Ritmo beta ( $\beta$ ):** La banda de frecuencia está entre 13 y 30 Hz y presenta amplitudes de 2 a 20  $\mu$ V. Se da cuando la persona está realizando actividad física o mental.

## 2.8 Ingeniería de rehabilitación

La ingeniería de rehabilitación es el campo en el que se combinan áreas de conocimiento como tecnología, ingeniería y salud para poder diseñar y desarrollar soluciones y dispositivos tecnológicos que permitan asistir a personas con discapacidades o movilidad reducida y a ayudar a su recuperación física. (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, 2024)

El presente proyecto de investigación hace parte de ingeniería de la rehabilitación ya que ayuda a la rehabilitación de mano para personas que sufrieron un accidente cerebrovascular por medio de una interfaz BCI para la activación del dispositivo de estimulación eléctrica funcional (Matheus & Ríos Rincón, 2006)

### 3 Diseño FES – BCI

Teniendo en cuenta lo mencionado en el capítulo anterior se propone un sistema que consta de una diadema que capta señales EEG y las envía a un dispositivo que se encarga de generar y aplicar corrientes eléctricas a los músculos del antebrazo a través de electrodos. La terapia de estimulación eléctrica funcional (FES), tiene como fin administrar estímulos eléctricos a nivel neuromuscular con el fin de provocar una contracción muscular, esto se logra variando una serie de parámetros de la señal eléctrica.

#### 3.1 Parámetros de la señal eléctrica

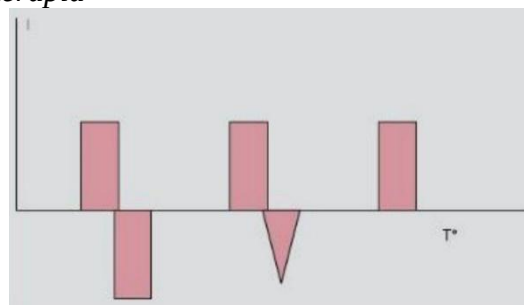
Para lograr controlar la contracción del músculo se tienen las siguientes características:

##### 3.1.1 Forma de onda

Usualmente se emplean formas de onda bifásica simétrica, bifásica asimétrica y rectangular monofásica.

**Figura 14**

*Formas de onda en electroterapia*



Nota. De izquierda a derecha, onda bifásica simétrica, bifásica asimétrica y rectangular

monofásica. Tomado de Neurorrehabilitación, Métodos específicos de valoración y tratamiento (P.408), por Cano de la Cuerda y Collado Vázquez.

La forma más empleada es la bifásica simétrica ya que esta no presenta efectos químicos o galvánicos polares en las zonas de aplicación, también presenta la menos cantidad de fatiga del músculo a mayor tiempo de aplicación de la corriente

### **3.1.2 Voltaje y corriente**

El voltaje máximo es 120 V pico de fase y en base a que la impedancia de carga sea de al menos  $500\Omega$ , se espera una corriente de 80mA pico. Basándonos en el dispositivo H200 Bioness.

### **3.1.3 Ancho de pulso**

El rango se tendrá entre los  $100\mu S$  y  $300\mu S$  en base a las especificaciones técnicas del H200 Bioness.

### **3.1.4 Frecuencia**

Oscila entre los 20 y 50 Hz, ya que es el rango típico empleados en la recuperación motora después de un ACV, fuera de ese rango se ha evidenciado fatiga muscular y pérdida en la fuerza muscular.

## **3.2 Parámetros de diseño del FES-BCI**

Si bien, existen valores típicos para producir las contracciones, se desea que el equipo se pueda utilizar en diferentes pacientes, para ello se establecen rangos de operación teniendo en consideración las especificaciones técnicas del BIONESS H200, ya que es un dispositivo comercial de alta relevancia en el campo.

### **3.2.1 Voltaje y corriente**

En base al BIONESS H200, se establece como voltaje máximo 120V pico de fase en base a que la impedancia de carga sea de al menos  $500\Omega$ , se espera una corriente de 80mA pico.

### 3.2.2 *Ancho de pulso*

Entre 100 y 300 microsegundos, para que se pueda adecuar a diferentes pacientes.

### 3.2.3 *Frecuencia*

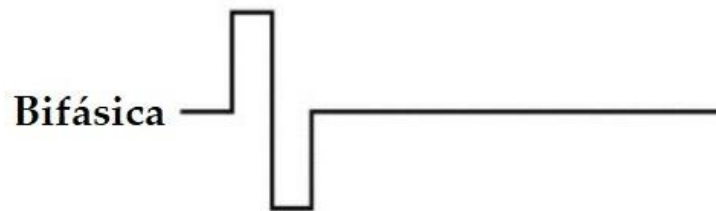
La frecuencia varía de 20 a 50 Hz

### 3.2.4 *Forma de onda*

Para prevenir que se presenten efectos químicos o galvánicos polares, se emplea como forma de onda bifásica simétrica.

**Figura 15**

*Onda bifásica*

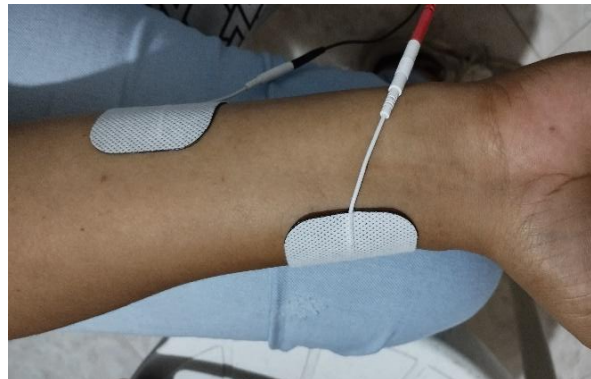


### 3.2.5 *Colocación de los electrodos*

Se sugieren las siguientes posiciones, sin embargo, se debe variar un poco según cada paciente, ver figura 16 y figura 17

**Figura 16**

*Posición apertura de mano*



Nota. Posición sugerida en base a la ubicación del grupo muscular involucrado en la acción y a una serie de pruebas.

**Figura 17**

*Posición cierre de mano*



Nota. Posición sugerida en base a la ubicación del grupo muscular involucrado en la acción y a una serie de pruebas.

### **3.3 Diadema y módulo TGAM**

Para poder obtener señales EEG del cerebro del paciente se opta por emplear un módulo comercial capaz de capturar y procesar estas señales. En este caso estamos usando una diadema de la línea de productos NeuroSky la cual cuenta con bluetooth incorporado que tiene una tasa de baudios de 57600 y sus rangos de frecuencia para las señales EEG se emiten en el siguiente orden: Delta ( $\delta$ ) 0,5 – 2,75 Hz; Theta ( $\theta$ ) 3,5 – 6,75 Hz; Baja alfa ( $\alpha$ ) 7,5 – 9,25 Hz; Alta alfa ( $\alpha$ ) 10 – 11,75 Hz; Baja Beta ( $\beta$ ) 13 – 16,75 Hz; Alto Beta ( $\beta$ ) 18 – 20,75 Hz; Gamma Bajo ( $\gamma$ ) 31-39,75 Hz y Gamma Medio ( $\gamma$ ) 41 – 49,75 Hz.

Además de estas señales, también captura señales eSense (atención y meditación) que varían en una escala relativa de 1 a 100, las cuales se escogieron para realizar el control de apertura y cierre de la mano.

Para dichas señales se escogieron datos mayores a 50 para así poder enviar la señal de control al dispositivo FES, basándonos en pruebas hechas en nosotros.

**Figura 18**

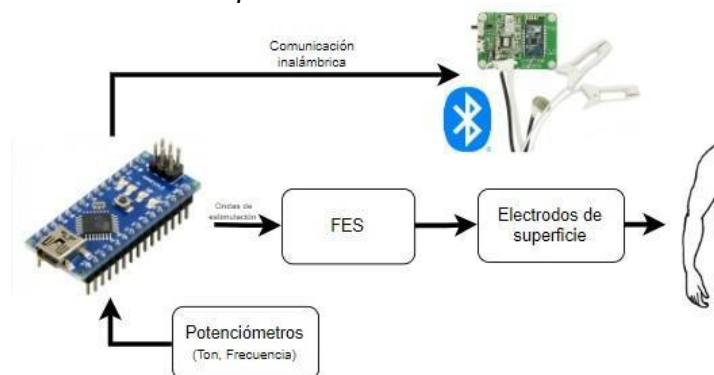
*Módulo comercial encargado de medir las señales EEG*



### 3.4 Diagrama de bloques del sistema FES-BCI

**Figura 19**

*Diagrama de bloques del circuito completo*



### 3.5 Circuito electrónico FES

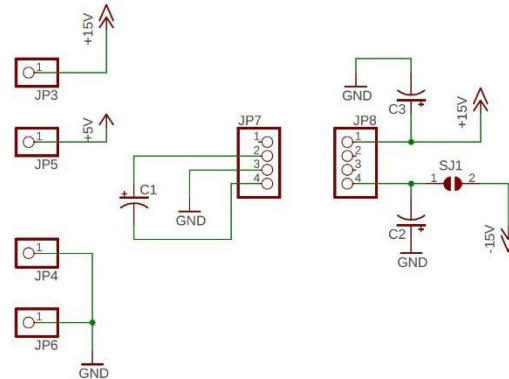
El dispositivo de estimulación eléctrica funcional cuenta en su diseño con 5 etapas: alimentación, microcontrolador, generación de onda, push-pull, elevador voltaje.

#### 3.5.1 Alimentación

Para alimentar el FES se utiliza el circuito que se presenta en la figura 20, el cual es un conversor de voltaje DC TC7662, el cual nos permite suministrar +- 15V, ya que la entrada se Proporcionan 15 V que se obtienen de elevar el voltaje de una batería de litio de 3,7 V nominales, por medio del módulo XL6009

**Figura 20**

*Circuito encargado de suministrar los +15V y -15V*

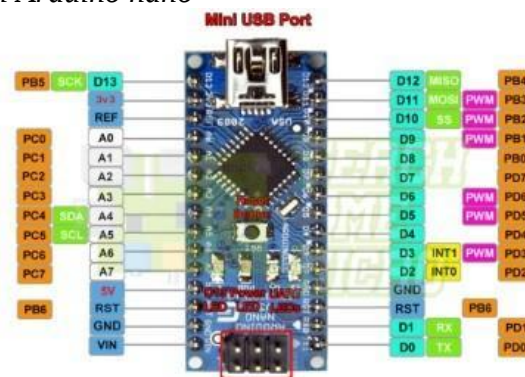


### 3.5.2 Microcontrolador

Se requiere hacer una conexión entre diadema EEG y el FES, debido a que el módulo TGAM se comunica por medio de bluetooth a una tasa de 57.600 Baudios, se eligió la tarjeta de control Arduino Nano, conectado a un módulo HC-05 en modo maestro ya que se facilita la conexión y configuración y es de bajo consumo energético, además será usado para procesar los niveles de las señales eSense (Atención y Meditación) y generar las ondas de estimulación.

**Figura 21**

*Descripción de los pines del Arduino nano*



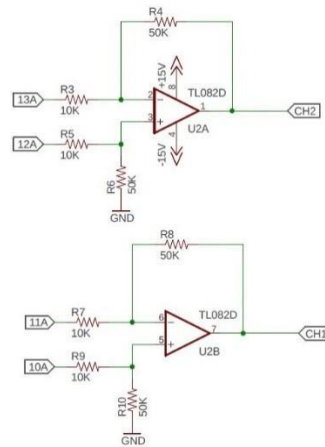
### 3.5.3 Generación de la onda

La señal de estimulación es una señal bifásica simétrica y variable en amplitud, frecuencia de 10 a 50 Hz y tiempo de fase de 100us, 200us y 300us.

Para obtener la señal se usan dos ondas cuadradas con las mismas características de amplitud, tiempo de fase y frecuencia (se obtiene del microcontrolador); se desfasa el tiempo de inicio de pulso y se usa un amplificador operacional en modo restador para que a la salida de este se obtenga la señal bifásica simétrica.

**Figura 22**

*Opam en configuración restador*

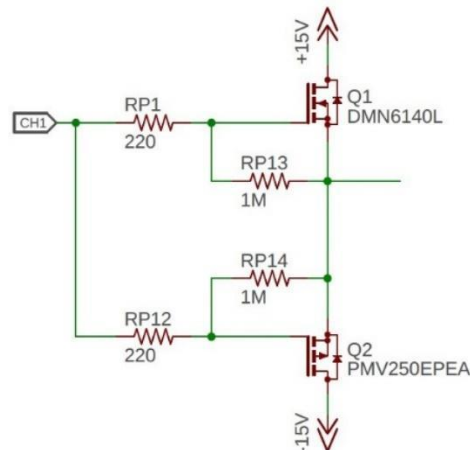


### 3.5.4 Push-pull.

Esta etapa se encarga de generar la onda bifásica simétrica con la potencia necesaria para poder ser usada en la etapa de elevación de tensión.

**Figura 23**

*Circuito encargado de suministrar potencia a la señal*

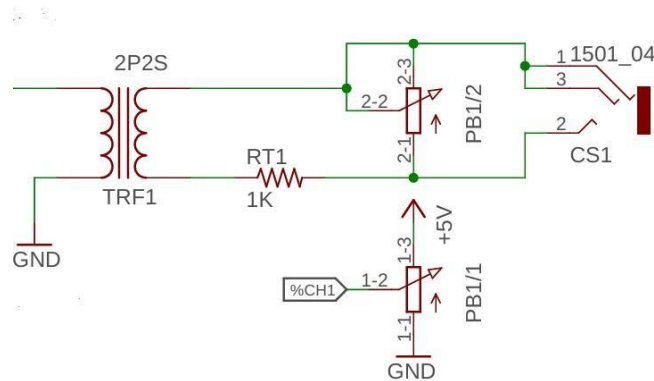


### 3.5.5 Elevador de tensión

Ya que es requisito elevar la tensión aproximadamente a 120 V pico, por practicidad se emplea un transformador laminado con relación 1 a 10, cuya inductancia en el embobinado primario es de 4mH y en el secundario de alrededor 730mH aproximadamente.

**Figura 24**

*Circuito elevador*

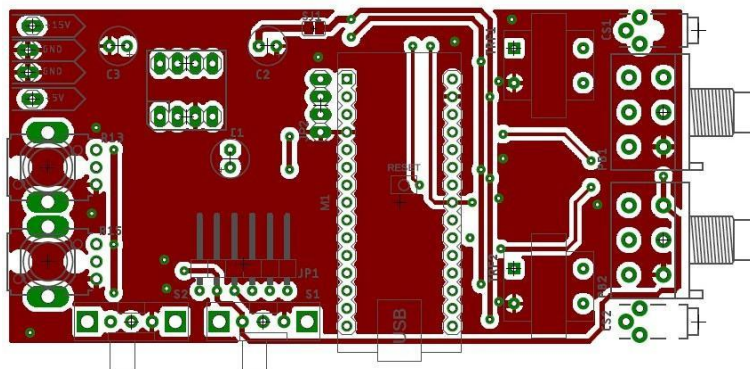


### 3.6 PBC

Para el diseño de la PCB se hizo de doble capa para asegurar que tenga el menor tamaño y que los conectores y potenciómetros tengan una disposición cómoda a la hora de ser utilizados.

**Figura 25**

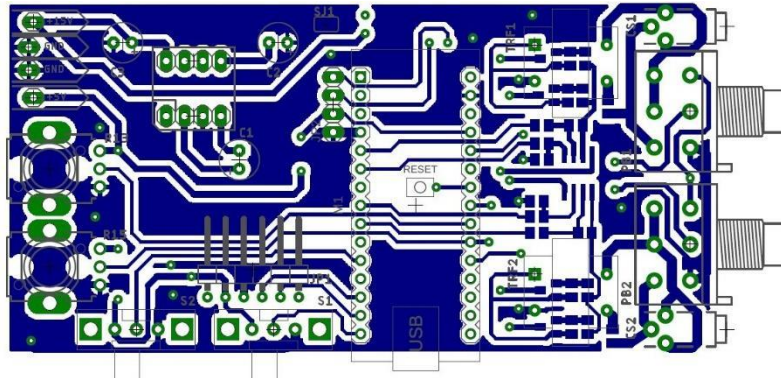
*Capa superior de la PCB*



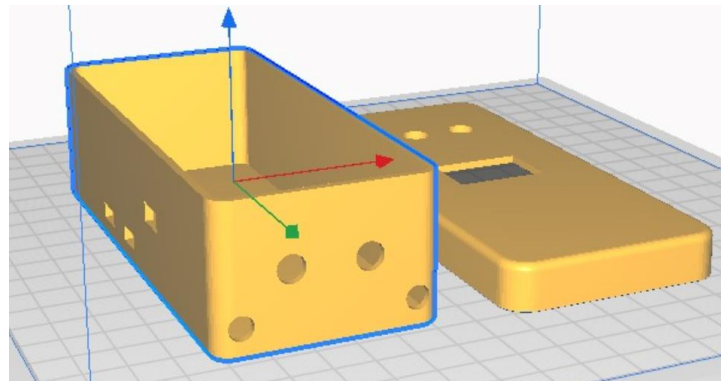
Los componentes empleados son de montaje superficial a excepción de los potenciómetros, transformadores, switches y los conectores de los electrodos ya que no son fáciles de conseguir en SMD y elevan demasiado el costo del dispositivo.

**Figura 26**

*Capa inferior de la PCB*



### 3.7 Carcasa 3D



### 3.8 Software de aprendizaje

Para ayudar al usuario a mejorar el control sobre la señal de meditación y atención que son las encargadas de apertura y cierre de la mano respectivamente, se tiene a disposición una serie de aplicaciones las cuales se pueden encontrar en la página de la empresa que desarrolla la diadema ([https://store.neurosky.com/collections/apps/pc?sort\\_by=price-ascending](https://store.neurosky.com/collections/apps/pc?sort_by=price-ascending)). Dentro de las aplicaciones se recomiendan las siguientes 2 ya que son gratis e interactivas:

**Figura 27**

*Brainwave Visualizer app*

**Figura 28**

*Mind Wave Mobile Tutorial app*



## 4 Resultados

### 4.1 Diadema

**Figura 29**

*Diadema para la captación de las señales de control*



Nota. Con la diadema viene un adaptador bluetooth el cual permite conectar la diadema a un pc.

## 4.2 Tarjeta electrónica

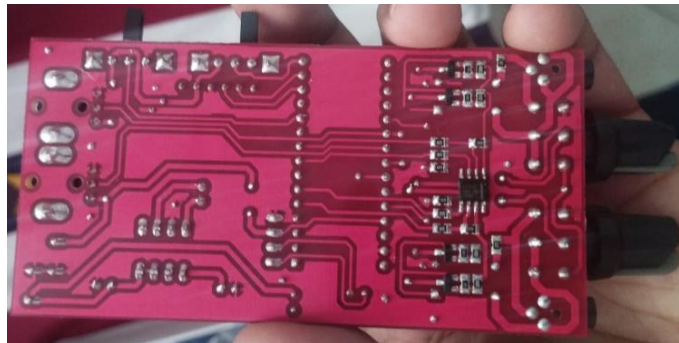
**Figura 30**

*PCB lado superior*

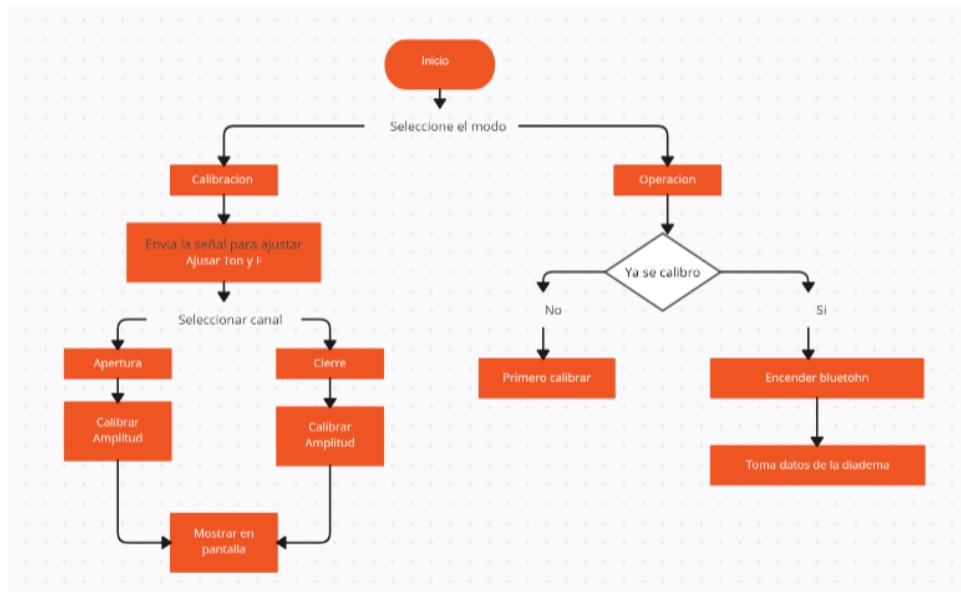


**Figura 31**

*PCB lado inferior*



## 4.3 Programa del microcontrolador



#### 4.4 Carcasa 3D



#### 4.5 Costos

El costo final del dispositivo fue de \$1'280.000, que en dólares es equivalente a \$318.69 dólares a la fecha de escrito el documento (1 dólar = 4016.5 pesos colombiano)

Como se expuso en la justificación, dentro de los dispositivos consultados para rehabilitación, estos son de uso médico y requieren de asistencia de un profesional de la salud, además no favorecen a la neuroplasticidad, que es la que permite que con el tiempo el paciente ya no dependa del dispositivo.

**Tabla 1**

Costos del proyecto

| Elemento                                     | Costo                        |
|----------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Diadema</b>                               | \$280.000                    |
| <b>PCB</b>                                   | \$300.000                    |
| <b>Componentes electrónicos</b>              | \$250.000                    |
| <b>Diseño PCB y soldadura de componentes</b> | \$300.000                    |
| <b>Diseño 3D</b>                             | \$150.000                    |
| <b>Valor total</b>                           | \$1'280.000 (302 USD Aprox.) |

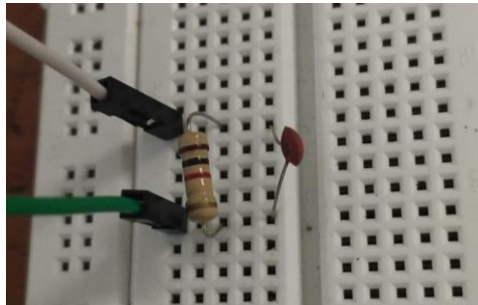
Nota: Información tomada de acuerdo a lo presentado en el proyecto

## 5 Validación del Sistema

Para realizar la validación del sistema usamos una impedancia de carga, conformada por una resistencia de 1K Ohm y un capacitor de 100 pF que simulan la impedancia de la piel:

**Figura 32**

*Impedancia de carga*



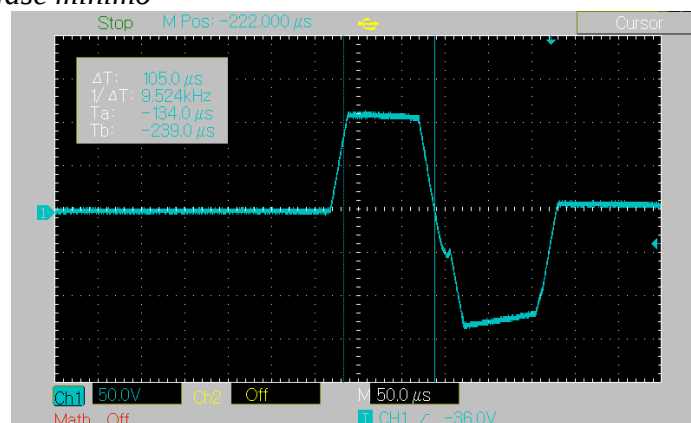
Se calcula el error asociado al ancho de pulso y la frecuencia.

$$\%error = \frac{|Valor\ te\acute{o}rico - Valor\ medido|}{Valor\ te\acute{o}rico} * 100$$

### 5.1 Ton Mín.

**Figura 33**

*Medición tiempo de fase mínimo*

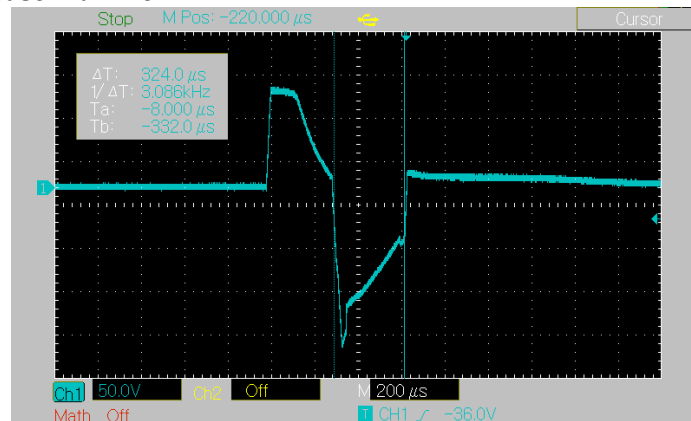


$$\%error = \frac{|100 - 105|}{100} * 100 = 5\%$$

## 5.2 Ton Máx.

**Figura 34**

*Medición tiempo de fase máximo*



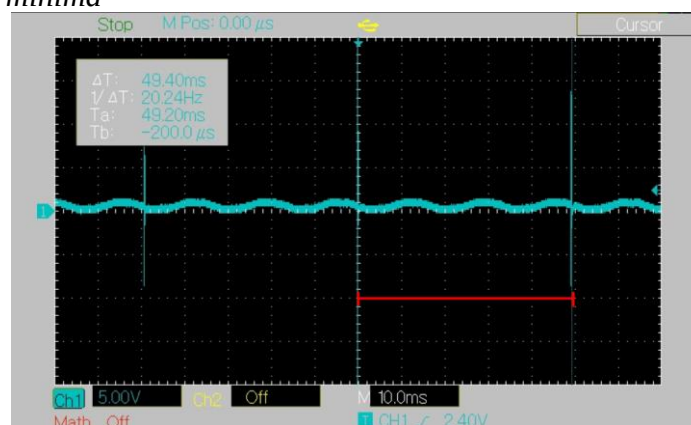
Se calcula el error asociado al ancho de pulso mínimo:

$$\%error = \frac{|300 - 324|}{300} * 100 = 8\%$$

## 5.3 F Mín.

**Figura 35**

*Medición frecuencia mínima*

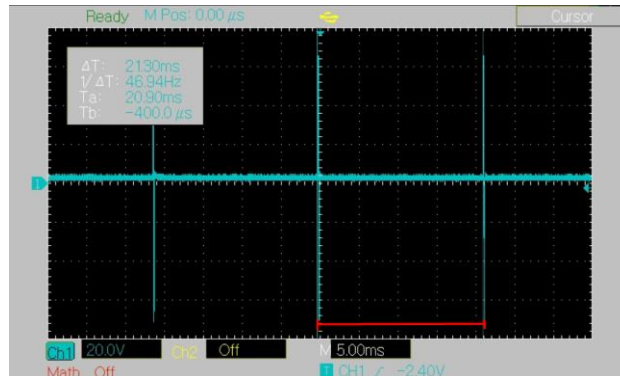


Se calcula el error asociado al ancho de pulso mínimo:

$$\%error = \frac{|20 - 20.24|}{20} * 100 = 1,2\%$$

## 5.4 F Máx.

### Medición frecuencia máxima



$$\%error = \frac{|50 - 46.94|}{50} * 100 = 6,12\%$$

## 5.5 Eficacia de la diadema

Para probar la eficacia de la diadema realizamos una prueba en la que se hicieron 10 tomas por cada acción, en donde cada valor tiene un nivel entre 0 y 100 y nos indica la intensidad de atención y meditación para el cierre y apertura de mano respectivamente:

**Tabla 2**

Pruebas del sistema FES\_BCI con acción esperada: cierre

| Cierre | Apertura | Acción esperada | Acción Realizada |
|--------|----------|-----------------|------------------|
| 83     | 64       | Cierre          | Cierre           |
| 65     | 50       | Cierre          | Cierre           |
| 60     | 45       | Cierre          | Cierre           |
| 76     | 40       | Cierre          | Cierre           |
| 55     | 32       | Cierre          | Cierre           |
| 80     | 77       | Cierre          | Cierre           |
| 75     | 82       | Cierre          | Apertura         |
| 21     | 44       | Cierre          | Cierre           |
| 68     | 73       | Cierre          | Apertura         |
| 95     | 81       | Cierre          | Cierre           |

Nota: Información tomada de prueba en el laboratorio

**Tabla 3**

Pruebas del sistema FES\_BCI con acción esperada: apertura

| <b>Cierre</b> | <b>Apertura</b> | <b>Acción esperada</b> | <b>Acción Realizada</b> |
|---------------|-----------------|------------------------|-------------------------|
| 64            | 53              | Apertura               | Cierre                  |
| 30            | 45              | Apertura               | Apertura                |
| 55            | 91              | Apertura               | Apertura                |
| 32            | 53              | Apertura               | Apertura                |
| 78            | 65              | Apertura               | Cierre                  |
| 60            | 71              | Apertura               | Apertura                |
| 68            | 63              | Apertura               | Cierre                  |
| 44            | 59              | Apertura               | Apertura                |
| 71            | 78              | Apertura               | Apertura                |
| 64            | 76              | Apertura               | Apertura                |

Nota: Información tomada de prueba en el laboratorio

La eficiencia para el sistema en cuanto a las pruebas fue:

- **Acción esperada cierra:** Eficiencia del 80%
- **Acción esperada apertura:** Eficiencia del 70%

Para poder mejorar la eficacia se debe realizar un entrenamiento con el software que de aprendizaje descrito en la sección 5.8.

## 6 Conclusiones

- Para la comunicación entre la diadema BCI y el dispositivo FES, se utilizó la comunicación Bluetooth en vez de la comunicación Wifi, por su bajo consumo de energía (Bluetooth Low Energy o BLE), alcance adecuado para aplicaciones personales (entre 10 y 100m), menor interferencia, simplicidad en la transmisión de los datos y mayor privacidad y seguridad en

el ámbito local. Además, la diadema BCI comercial de bajo costo que se adquirió trae incluido el módulo Bluetooth.

- Las especificaciones técnicas de diseño se determinaron de modelos comerciales, como el Bioness H200 y se complementa con la literatura encontrada relacionada con la estimulación eléctrica, esto con el objetivo de emplear valores que ya se encuentran en dispositivos comerciales y prototipos desarrollados en proyectos de investigación.
- Se construyó un prototipo de bajo costo (\$1.280.000) comparado con los modelos comerciales de más de U\$4.000, lo cual indica que en Colombia tenemos la capacidad de producir este tipo de tecnología médica con precios al alcance de personas de escasos recursos económicos.
- Las pruebas de validación indicaron que los valores de los parámetros FES medidos en la práctica, estuvieron muy cerca de los valores seleccionados para el diseño. Así mismo la eficacia del dispositivo FES para rehabilitación de mano construido, fue buena, teniendo en cuenta que depende de la destreza del usuario para generar las señales de control que de la diadema BCI se envían al dispositivo FES.

## **7 Recomendaciones**

Se sugiere, si es posible, utilizar un microcontrolador ESP32, ya que este cuenta con bluetooth lo que reduciría el peso y las dimensiones de la tarjeta, a su vez, potenciómetros digitales para disminuir significativamente el peso del dispositivo. Cambiar el amplificador por uno de mejores características, así como los mosfet por unos con mejor tiempo de conmutación.

Es posible encontrar diademas de captación de señales EEG de mejores características, si bien son un poco más costosas traen mejoras y tiempos más rápidos a la hora de captar los datos.

Dentro de las pruebas que pudimos realizar encontramos que la intensidad de la corriente aplicada es algo alta, por lo que se recomienda cambiar los 2 potenciómetros del ajuste de voltaje de 10k ohmios a 30k o 50k ohmios, esto con el fin de reducir la intensidad de la corriente de estimulación y que tenga un mejor rango de estimulación.

## Referencias

- American Stroke Association. (1 de Abril de 2024). *About Stroke*. Obtenido de American Stroke Association: <https://stroke.org/en/about-stroke-es>
- Centro de Especialidades Ortopédicas. (30 de Agosto de 2022). *¿Qué es la terapia CPM (Movimiento pasivo continuo)?* Obtenido de Centro de Especialidades Ortopédicas: <https://www.ceoecuador.com/que-es-la-terapia-cpm-movimiento-pasivo-continuo/>
- Clínica Uner. (30 de Agosto de 2023). *¿Qué es la paresia y qué la provoca?* Obtenido de Clínica Uner: <https://clinicauner.es/que-es-la-paresia-y-que-la-provoca/>
- Consuelo Doddoli, UNAM. (24 de Junio de 2022). *La plasticidad cerebral nos permite cambiar y aprender a lo largo de la vida*. Obtenido de Ciencia UNAM: <https://ciencia.unam.mx/leer/1278/la-plasticidad-cerebral-nos-permite-cambiar-y-aprender-a-lo-largo-de-la-vida>
- Curiosoando. (13 de Septiembre de 2017). *¿Cuáles son los huesos de la mano?* Obtenido de Curiosoando.com: <https://curiosoando.com/huesos-de-la-mano>
- Enovis. (1 de abril de 2024). *ARTROMOT®-H*. Obtenido de Enovis: [https://enovis-medtech.eu/en\\_US/Artromot-H-74878.html#mta--tabs\\_products1](https://enovis-medtech.eu/en_US/Artromot-H-74878.html#mta--tabs_products1)
- Flint Rehab. (1 de abril de 2024). *Neuroplasticidad después del accidente cerebrovascular: cómo el cerebro se reconecta para recuperarse de una lesión*. Obtenido de Flint Rehab Dispositivos para la recuperación: <https://www.flintrehab.com/es/neuroplasticidad-despues-del-accidente-cerebrovascular/>
- G. E. Mann, J. H. (2005). *Pilot study to investigate the effects of electrical stimulation on recovery of hand function and sensation in subacute stroke patients* (Vol. 8). (Neuromodulation, Ed.) .

- G. Mann, P. T. (2011). *Accelerometer-Triggered Electrical Stimulation for Reach and Grasp in Chronic Stroke Patients: A Pilot Study* (Vol. 25). : Neurorehabilitation and Neural Repair.
- G. Snoek, M. J. (2000). *Use of the NESS handmaster to restore hand function in tetraplegia: clinical experiences in ten patients* (Vol. 38). : Spinal Cord.
- Grefkes, C. F. (16 de Junio de 2020). *Recovery from stroke: current concepts and future perspectives*. Obtenido de <https://doi.org/10.1186/s42466-020-00060-6>
- Guadamuz Delgado, J., Miranda Saavedra, M., & Mora Miranda, N. (1 de Junio de 2022). Obtenido de <https://revistamedicasinergia.com/index.php/rms/article/view/829>
- Hernández-Muela, S. M. (2004). Hernández-Muela, S., Mulas, F., & Mattos, L. (2004). Plasticidad neuronal funcional. *Rev Neurol*, 38(1), 58-68.
- hipnosisterapeuticaregresiva. (3 de Agosto de 2016). *Ondas Cerebrales y Estados de la Mente*. Obtenido de hipnosisterapeuticaregresiva: <https://hipnosisterapeuticaregresiva.com/ondas-cerebrales-y-estados-de-la-mente/>
- J. Eraifej, W. C. (2017). *Effectiveness of upper limb functional electrical stimulation after stroke for the improvement of activities of daily living and motor function: a systematic review and meta-analysis* (Vol. 6). : Systematic Reviews.
- Kapadia, N., Moineau, B., & Popovic, M. R. (9 de Julio de 2020). *Functional Electrical Stimulation Therapy for Retraining Reaching and Grasping After Spinal Cord Injury and Stroke*. Obtenido de Frontiers in Neuroscience: <https://www.proquest.com/docview/2421632328?sourcetype=Scholarly%20Journals>
- Matheus, M. M., & Ríos Rincón, A. (2006). La tecnología en rehabilitación: una aproximación conceptual. *Cienc. Salud*, 98-108.

- National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. (1 de Abril de 2024). *Ingeniería de Rehabilitación*. Obtenido de National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering: <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/ingenier%C3%ADa-de-rehabilitaci%C3%B3n#pid-1911>
- Popovic, C. M.-C. (2020). *Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review*. (19, Ed.) , 34: BioMed Eng OnLine.
- Pulido, J. C. (23 de Octubre de 2023). *Neuroplasticidad: qué es, cuál es su importancia y cómo se puede potenciar*. Obtenido de inrobics: <https://inrobics.com/neuroplasticidad-importancia-como-potenciar/>
- realidadfitness. (1 de Abril de 2024). *Ejercicios Para Antebrazo: Entrenamiento De Fuerza E Hipertrofia Con Rutinas*. Obtenido de realidadfitness: <https://realidadfitness.com/entrenamiento/entrenamiento-de-antebrazos/>
- Rehab-Robotics. (1 de Enero de 2024). *Hand of Hope Basics*. Obtenido de Rehab-Robotics: [https://www.rehab-robotics.com.hk/hoh/hoh\\_basic.html](https://www.rehab-robotics.com.hk/hoh/hoh_basic.html)
- rhbneuromad. (15 de Junio de 2017). *Estimulación Eléctrica Funcional en Lesiones Nerviosas Centrales*. Obtenido de rhbneuromad: <https://rhbneuromad.com/2017/06/15/articulo-estimulacion-electrica-funcional-en-lesiones-nerviosas-centrales/>
- Sánchez, H. (8 de Agosto de 2023). *Rehabilitación post-ACV*. Obtenido de Revista de la Sociedad Argentina de Diabetes: <https://revistasad.com/index.php/diabetes/article/view/684>
- The Stroke Foundation. (1 de Abril de 2024). *La neuroplasticidad y recuperación de un ACV*. Obtenido de The Stroke Foundation: <https://thestrokefoundation.org/es/la-neuroplasticidad-y-recuperacion-de-un-acv/>

todocuerpohumano.com. (1 de Abril de 2024). *Nervios de la extremidad superior*. Obtenido de  
todocuerpohumano.com: <https://todocuerpohumano.com/nervios-de-la-extremidad-superior/>

World Health Organization. (1 de Enero de 2020). *Global health estimates: Leading causes of death*. Obtenido de World Health Organization:  
<https://www.who.int/data/gho/data/themes/mortality-and-global-health-estimates/ghe-leading-causes-of-death>

World Health Organization. (9 de Diciembre de 2020). *The top 10 causes of death*. Obtenido de who: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>

## **PROYECTOS FUTUROS**

Para proyectos futuros se puede modificar el rango de selección de las señales de control para que la diadema TGAM envíe las señales de control al dispositivo FES, este rango puede variar de 0 a 100 en una escala relativa, lo recomendado en la documentación de la diadema es el rango de 40 a 60.

Se pueden realizar pruebas entre varias personas para seleccionar el rango más apropiado para las personas que serán beneficiarias de esta tecnología