



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE BIOMEDICINA**

**REDISEÑO DE UN MÓDULO ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL DE  
UN SISTEMA DE REHABILITACIÓN MOTORA ROBÓTICA CON  
EMOTIV EPOC**

Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniera Biomédica

AUTORA: HEATHER PAMELA ULLOA CABRERA

TUTORA: Ing. ANA CECILIA VILLA PARRA, Ph.D.

Cuenca – Ecuador

2026

# **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Heather Pamela Ulloa Cabrera con documento de identificación N° 1729233096 manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 6 de febrero del 2026

Atentamente,



---

Heather Pamela Ulloa Cabrera  
1729233096

# **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Heather Pamela Ulloa Cabrera con documento de identificación N° 1729233096, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Rediseño de un Módulo Electrónico para el Control de un Sistema de Rehabilitación Motora Robótica con Emotiv Epc”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Biomédica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 6 febrero del 2026

Atentamente,



---

Heather Pamela Ulloa Cabrera  
1729233096

# CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ana Cecilia Villa Parra con documento de identificación N° 0103874194, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REDISEÑO DE UN MÓDULO ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL DE UN SISTEMA DE REHABILITACIÓN MOTORA ROBÓTICA CON EMOTIV EPOC, realizado por Heather Pamela Ulloa Cabrera con documento de identificación N° 1729233096, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 6 de febrero del 2026

Atentamente,



**Ana Cecilia Villa  
Parra**



---

Ing. Ana Cecilia Villa Parra, Ph.D.  
0103874194

# Dedicatoria

*Heather Pamela Ulloa Cabrera*

El presente proyecto de titulación está dedicado:

A Dios, quien ha guiado mi vida y me ha dado la fortaleza para tomar decisiones, incluso cuando no he comprendido del todo sus propósitos. Hoy reconozco que todo sucede por una razón y que su plan es perfecto, aun en los momentos de duda.

A mis padres, a mi mamá Aida Cecilia Cabrera Arias, a mi papá Elio Oswaldo Ulloa Reinoso, y a mi hermano Thomas Oswaldo Ulloa Cabrera, por su apoyo constante, su infinita paciencia y el amor incondicional que me han brindado en cada etapa de mi vida. Gracias por creer en mí, por acompañarme en los momentos difíciles y por ser mi mayor motivación para seguir adelante.

También quiero dedicar este logro a mis amigos en Estados Unidos, a quienes espero volver a ver pronto. Gracias por ser parte importante de mi vida, por los recuerdos, el cariño y el apoyo que siempre me han dado. Nunca los olvidaré, porque han marcado mi camino y han contribuido a la persona que soy hoy.

Finalmente, a mis amigos en Ecuador, a quienes nunca imaginé conocer, pero por quienes agradezco profundamente a Dios. En un lugar nuevo para mí, ustedes llegaron en el momento correcto, me abrieron las puertas, me acompañaron en procesos importantes y me hicieron sentir que no estaba sola. Con ustedes aprendí que la familia también se construye con personas que el camino nos regala, y que un hogar no siempre es un lugar, sino la gente que te sostiene. Han sido una segunda familia, y por eso valoro tanto las amistades que formé aquí. Mi deseo es que estos lazos se mantengan con el tiempo, que sigamos creciendo y que la vida nos permita seguir compartiendo, sin importar la distancia, durante el resto de mi vida.

# Agradecimientos

*Heather Pamela Ulloa Cabrera*

Agradezco principalmente a Dios por permitirme cumplir esta meta. Gracias por darme salud, fuerzas, determinación y por guiarme en cada paso, incluso cuando las cosas se ponían difíciles.

Agradezco profundamente a mis padres por su amor incondicional, su paciencia y por estar conmigo en todo momento. Gracias por cada enseñanza, por cada sacrificio y por creer en mí aun cuando yo me sentía agotada. Ustedes han sido mi apoyo más grande, mi motivación y mi ejemplo. Todo lo que he logrado hasta hoy también es gracias a ustedes.

A mis amigos, gracias por estar conmigo, por acompañarme y apoyarme en los momentos de estrés y cansancio. Sus palabras, su tiempo y su ánimo hicieron una gran diferencia.

Quiero agradecer de manera especial a Washington Javier Campoverde Llanos, investigador del GIIB, y a los ingenieros Angel Sebastian Pomaquiza Chiriboga y Kevin Mateo Gutiérrez Ortiz, por el apoyo tan grande que me dieron durante el desarrollo de mi trabajo de titulación. Gracias por su tiempo, por su ayuda y por estar pendientes cuando necesitaba orientación.

También quiero agradecer a la Ing. Ana Cecilia Villa Parra, Ph.D., por su acompañamiento durante todo este proceso, por sus consejos y por ayudarme a mejorar el trabajo con sus sugerencias.

# Índice

|                                                                                                                |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación                                             | I        |
| Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad<br>Politécnica Salesiana | II       |
| Certificado de dirección del trabajo de titulación                                                             | III      |
| Dedicatoria                                                                                                    | IV       |
| Agradecimientos                                                                                                | V        |
| Resumen                                                                                                        | XII      |
| Abstract                                                                                                       | XIII     |
| <b>1. Introducción</b>                                                                                         | <b>1</b> |
| <b>2. Problema</b>                                                                                             | <b>1</b> |
| 2.1. Antecedentes . . . . .                                                                                    | 1        |
| 2.2. Importancia y alcances . . . . .                                                                          | 2        |
| 2.3. Delimitación . . . . .                                                                                    | 2        |
| <b>3. Objetivos</b>                                                                                            | <b>2</b> |
| 3.1. Objetivo general . . . . .                                                                                | 2        |
| 3.2. Objetivos específicos . . . . .                                                                           | 3        |
| <b>4. Hipótesis</b>                                                                                            | <b>3</b> |
| 4.1. Hipótesis general . . . . .                                                                               | 3        |
| 4.2. Hipótesis específicas . . . . .                                                                           | 3        |
| <b>5. Marco teórico</b>                                                                                        | <b>3</b> |
| 5.1. Neuroplasticidad y recuperación motora . . . . .                                                          | 4        |
| 5.2. Rehabilitación post-ACV y enfoque terapéutico moderno . . . . .                                           | 6        |
| 5.3. Emotiv EPOC . . . . .                                                                                     | 7        |
| 5.3.1. Interfaces cerebro-computadora (BCI) . . . . .                                                          | 8        |
| 5.3.2. Emotiv Launcher . . . . .                                                                               | 9        |

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.3.3. Cortex API . . . . .                                                                      | 12        |
| 5.4. Actuadores para la rehabilitación . . . . .                                                 | 13        |
| 5.4.1. Guante robótico Tongboshi . . . . .                                                       | 13        |
| 5.4.2. Minibike RYGEO . . . . .                                                                  | 14        |
| 5.4.3. Órtesis de codo ZB-S1001 . . . . .                                                        | 15        |
| 5.5. Primera versión del sistema de rehabilitación robótica controlado por Emotiv EPOC . . . . . | 17        |
| <b>6. Marco metodológico</b>                                                                     | <b>17</b> |
| 6.1. Diagrama de bloques del módulo . . . . .                                                    | 18        |
| 6.2. Evaluación del primer prototipo . . . . .                                                   | 19        |
| 6.2.1. Participantes y protocolo de prueba . . . . .                                             | 19        |
| 6.2.2. Desempeño del sistema en Modo 1 (control voluntario) . . . . .                            | 21        |
| 6.2.3. Desempeño del sistema en Modo 2 (control guiado) . . . . .                                | 22        |
| 6.2.4. Tiempo de reacción en Modo 2 . . . . .                                                    | 23        |
| 6.2.5. Comparación entre Modo 1 y Modo 2 . . . . .                                               | 24        |
| 6.2.6. Evaluación de usabilidad mediante SUS - Prototipo 1 . . . . .                             | 25        |
| 6.3. Diseño del segundo prototipo . . . . .                                                      | 27        |
| 6.3.1. Integración del Emotiv EPOC con Cortex API . . . . .                                      | 28        |
| 6.3.2. Guante robótico . . . . .                                                                 | 29        |
| 6.3.3. Minibike . . . . .                                                                        | 31        |
| 6.3.4. Órtesis de codo . . . . .                                                                 | 34        |
| 6.3.5. Integración de actuadores con Emotiv EPOC . . . . .                                       | 36        |
| 6.3.6. Placa PCB . . . . .                                                                       | 39        |
| 6.3.7. Diseño de la carcasa del módulo . . . . .                                                 | 41        |
| 6.3.8. Interfaz gráfica . . . . .                                                                | 42        |
| 6.4. Pruebas de funcionalidad . . . . .                                                          | 46        |
| 6.4.1. Pruebas técnicas . . . . .                                                                | 46        |
| 6.4.2. Pruebas preliminares . . . . .                                                            | 47        |
| <b>7. Resultados y discusión</b>                                                                 | <b>51</b> |
| 7.1. Módulo electrónico . . . . .                                                                | 51        |
| 7.1.1. Sistema completo . . . . .                                                                | 55        |
| 7.2. Interfaz de terapia . . . . .                                                               | 57        |
| 7.2.1. Configuración de conexión . . . . .                                                       | 58        |

|            |                                                                                                                                          |           |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 7.2.2.     | Registro de datos del paciente . . . . .                                                                                                 | 60        |
| 7.2.3.     | Selección de modo de trabajo . . . . .                                                                                                   | 60        |
| 7.2.4.     | Configuración Emotiv–Cortex . . . . .                                                                                                    | 61        |
| 7.2.5.     | Configuración de terapia . . . . .                                                                                                       | 64        |
| 7.2.6.     | Ejecución de terapia . . . . .                                                                                                           | 64        |
| 7.2.7.     | Datos en Excel de paciente . . . . .                                                                                                     | 66        |
| 7.3.       | Pruebas . . . . .                                                                                                                        | 68        |
| 7.3.1.     | Resultados de las pruebas técnicas . . . . .                                                                                             | 68        |
| 7.3.2.     | Resultados de las pruebas preliminares en sujetos . . . . .                                                                              | 72        |
| 7.4.       | Análisis comparativo y discusión de resultados . . . . .                                                                                 | 75        |
| 7.4.1.     | Análisis de las pruebas técnicas . . . . .                                                                                               | 75        |
| 7.4.2.     | Análisis de las pruebas preliminares . . . . .                                                                                           | 76        |
| 7.4.3.     | Comparación entre las versiones del sistema . . . . .                                                                                    | 82        |
| <b>8.</b>  | <b>Presupuesto</b>                                                                                                                       | <b>82</b> |
| 8.1.       | Talento humano . . . . .                                                                                                                 | 83        |
| 8.2.       | Equipos y actuadores . . . . .                                                                                                           | 83        |
| 8.3.       | Componentes . . . . .                                                                                                                    | 83        |
| <b>9.</b>  | <b>Conclusiones</b>                                                                                                                      | <b>85</b> |
| 9.1.       | Trabajos futuros . . . . .                                                                                                               | 85        |
| <b>10.</b> | <b>Recomendaciones</b>                                                                                                                   | <b>86</b> |
|            | <b>Referencias</b>                                                                                                                       | <b>87</b> |
|            | <b>ANEXOS</b>                                                                                                                            | <b>94</b> |
| A:         | Firmware del ESP32 para recepción de comandos y control de actuadores . . .                                                              | 95        |
| B:         | Placa PCB con agujeros de succión en Altium . . . . .                                                                                    | 96        |
| C:         | Consentimiento Informado para la realización de pruebas del Sistema para<br>Rehabilitación Robótica Controlado por Emotiv EPOC . . . . . | 97        |
| D:         | Cuestionario SUS - Escala de Usabilidad del Sistema . . . . .                                                                            | 100       |
| E:         | Protocolo de pruebas - Sistema de Rehabilitación Robótica Controlado por Emotiv<br>EPOC . . . . .                                        | 102       |
| F:         | Manual de Usuario - Sistema de control de terapia robótica . . . . .                                                                     | 103       |

## Lista de Tablas

|     |                                                                                |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | Comparación entre rehabilitación tradicional y rehabilitación robótica. . . .  | 7  |
| 2.  | Respuestas completas del cuestionario SUS (P1–P31). . . . .                    | 26 |
| 3.  | Rangos de interpretación del puntaje SUS. . . . .                              | 27 |
| 4.  | Estimación de consumo de corriente por bloque. . . . .                         | 37 |
| 5.  | Parámetros de diseño de la PCB. . . . .                                        | 41 |
| 6.  | Bornenas azules numeradas del 1 al 8 y su función. . . . .                     | 53 |
| 7.  | Conectores tipo DC (etiquetados de A a I) y su función. . . . .                | 53 |
| 8.  | Resumen de respuestas de pruebas de activación funcional - Modo 1. . . . .     | 68 |
| 9.  | Resumen de respuestas de pruebas de activación funcional - Modo 2. . . . .     | 68 |
| 10. | Comportamiento de la comunicación inalámbrica según la distancia. . . . .      | 69 |
| 11. | Resultados de prueba de estrés (modo 1). . . . .                               | 69 |
| 12. | Resultados de prueba de estrés (modo 2). . . . .                               | 70 |
| 13. | Verificación ante desconexiones repentinas. . . . .                            | 70 |
| 14. | Respuestas completas del cuestionario SUS del rediseño (P1–P4). . . . .        | 73 |
| 15. | Resultados individuales SUS por participante del rediseño. . . . .             | 74 |
| 16. | Criterios utilizados para evaluar la activación funcional del sistema. . . . . | 75 |
| 17. | Talento humano. . . . .                                                        | 83 |
| 18. | Equipos y actuadores. . . . .                                                  | 83 |
| 19. | Componentes y materiales. . . . .                                              | 84 |

## Lista de Figuras

|     |                                                                                          |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | Accidente cerebrovascular (ACV). . . . .                                                 | 4  |
| 2.  | Diagrama de Neuroplasticidad. . . . .                                                    | 5  |
| 3.  | Emotiv EPOC X. . . . .                                                                   | 8  |
| 4.  | Sistema Internacional 10-20 para la colocación de los electrodos extracraneales. . . . . | 9  |
| 5.  | Emotiv Launcher App. . . . .                                                             | 10 |
| 6.  | Ajuste del dispositivo Emotiv EPOC X. . . . .                                            | 11 |
| 7.  | Mapa de calidad de contacto. . . . .                                                     | 12 |
| 8.  | Guante robótico Tongboshi. . . . .                                                       | 14 |
| 9.  | Minibike RYGEO. . . . .                                                                  | 15 |
| 10. | Órtesis de codo ZB-S1001. . . . .                                                        | 16 |
| 11. | Módulo del primer sistema de rehabilitación robótica. . . . .                            | 17 |
| 12. | Diagrama de bloques del sistema propuesto. . . . .                                       | 18 |
| 13. | Porcentaje de uso de expresión facial. . . . .                                           | 20 |
| 14. | Frecuencia de uso de expresión facial entre mujeres y hombres. . . . .                   | 21 |
| 15. | Promedio de activaciones por actuador en el Modo 1. . . . .                              | 22 |
| 16. | Promedio de activaciones por actuador en el Modo 2. . . . .                              | 23 |
| 17. | Tiempo de reacción promedio por actuador en el Modo 2. . . . .                           | 24 |
| 18. | Comparación del promedio de activaciones por actuador entre Modo 1 y Modo 2. . . . .     | 25 |
| 19. | Puntuaciones SUS por participantes - Prototipo 1. . . . .                                | 27 |
| 20. | Sistema BCI para rehabilitación robótica. . . . .                                        | 29 |
| 21. | Conexión del guante robótico. . . . .                                                    | 30 |
| 22. | Conexión RF transmisor de minibike. . . . .                                              | 31 |
| 23. | Conexión RF receptor de minibike. . . . .                                                | 32 |
| 24. | Integración RF con BCI. . . . .                                                          | 33 |
| 25. | Conexión RF transmisor de órtesis de codo. . . . .                                       | 34 |
| 26. | Conexión RF receptor de órtesis de codo. . . . .                                         | 35 |
| 27. | Esquemático del módulo electrónico. . . . .                                              | 36 |
| 28. | Placa PCB en 2D. . . . .                                                                 | 39 |
| 29. | Placa PCB en 3D vista superior. . . . .                                                  | 40 |
| 30. | Placa PCB en 3D vista inferior. . . . .                                                  | 40 |
| 31. | Vistas principales de la carcasa. . . . .                                                | 42 |
| 32. | Código en Python de la interfaz gráfica de la terapia. . . . .                           | 43 |
| 33. | Módulo electrónico. . . . .                                                              | 52 |

|     |                                                       |    |
|-----|-------------------------------------------------------|----|
| 34. | Etiquetas de las borneras. . . . .                    | 52 |
| 35. | Cara A, B y C del módulo electrónico. . . . .         | 54 |
| 36. | Sistema Completo. . . . .                             | 57 |
| 37. | Pantalla de configuración de conexión. . . . .        | 58 |
| 38. | Mensaje de error de conexión. . . . .                 | 58 |
| 39. | Pantalla con error de conexión. . . . .               | 59 |
| 40. | Mensaje de conexión exitosa. . . . .                  | 59 |
| 41. | Pantalla de conexión exitosa. . . . .                 | 59 |
| 42. | Pantalla datos de paciente. . . . .                   | 60 |
| 43. | Pantalla selección de modo de rehabilitación. . . . . | 61 |
| 44. | Pantalla configuración Emotiv - Cortex. . . . .       | 62 |
| 45. | Mensaje de error con el Cortex. . . . .               | 62 |
| 46. | Pantalla de error con el Cortex. . . . .              | 63 |
| 47. | Pantalla exitosa con el Cortex. . . . .               | 63 |
| 48. | Pantalla de configuración de terapia. . . . .         | 64 |
| 49. | Pantalla en ejecución de la terapia - modo 1. . . . . | 65 |
| 50. | Pantalla en ejecución de la terapia - modo 2. . . . . | 65 |
| 51. | Mensaje de uso de botón de emergencia. . . . .        | 66 |
| 52. | Mensaje datos guardados. . . . .                      | 66 |
| 53. | Mensaje datos guardados exitosamente. . . . .         | 66 |
| 54. | Pantalla resumen - modo 1. . . . .                    | 67 |
| 55. | Pantalla resumen - modo 2. . . . .                    | 67 |
| 56. | Primera prueba de aislamiento. . . . .                | 71 |
| 57. | Segunda prueba de aislamiento. . . . .                | 71 |
| 58. | Tercera prueba de aislamiento. . . . .                | 72 |
| 59. | Puntuaciones por participante del rediseño. . . . .   | 74 |
| 60. | Activación y sincronización (modo 1). . . . .         | 77 |
| 61. | Activación y sincronización (modo 2). . . . .         | 78 |
| 62. | Tiempo de reacción promedio (modo 2). . . . .         | 79 |
| 63. | Variabilidad por sexo (modo 2). . . . .               | 80 |
| 64. | Interacción con los actuadores. . . . .               | 81 |
| 65. | Usabilidad y comodidad (cuestionario SUS). . . . .    | 82 |

## Resumen

**E**l presente trabajo tiene como finalidad diseñar y construir una segunda versión de un sistema para rehabilitación motora robótica controlada por Emotiv EPOC, con el propósito de mejorar la precisión, estabilidad y funcionalidad de la versión inicial. Para ello, se realizó una evaluación técnica y funcional del sistema previamente desarrollado, identificando fallas en la comunicación EEG–actuadores y en la estructura del módulo electrónico. A partir de estos resultados, se procedió al rediseño del sistema, incorporando mejoras electrónicas y de software que optimizan la respuesta del control cerebral hacia los actuadores robóticos. Además, se añadió una órtesis de codo al conjunto robótico, ampliando el rango de movimientos terapéuticos en extremidades superiores. Finalmente, se realizaron pruebas preliminares del nuevo sistema para validar su funcionamiento, estabilidad y adaptación a entornos de rehabilitación motora asistida, demostrando el potencial del Emotiv EPOC como herramienta accesible para aplicaciones biomédicas y terapéuticas.

**Palabras clave:** Rehabilitación motora, Robótica biomédica, Emotiv EPOC, Interfaz cerebro–computadora, Órtesis de codo, Neurorehabilitación, Señales EEG.

## Abstract

The purpose of this work is to design and build a second version of a robotic motor rehabilitation system controlled by Emotiv EPOC, with the aim of improving the accuracy, stability, and functionality of the initial version.

To this end, a technical and functional evaluation of the previously developed system was performed, identifying flaws in the EEG-actuator communication and in the structure of the electronic module.

Based on these results, the system was redesigned, incorporating electronic and software improvements that optimize the brain control response to the robotic actuators. In addition, an elbow orthosis was added to the robotic assembly, expanding the range of therapeutic movements in the upper extremities.

Finally, tests of the new system were conducted to validate its operation, stability, and adaptation to assisted motor rehabilitation environments, demonstrating the potential of the Emotiv EPOC as an accessible tool for biomedical and therapeutic applications.

**Keywords:** Motor rehabilitation, Biomedical robotics, Emotiv EPOC, Brain-computer interface, Elbow orthosis, Neurorehabilitation, EEG signals.

# 1. Introducción

El avance tecnológico en rehabilitación motora ha hecho que cada vez sea más común ver sistemas robóticos e interfaces cerebro-computadora (BCI, por sus siglas en inglés) que permiten una comunicación más directa entre el cerebro y dispositivos externos. Este tipo de tecnologías se han convertido en una alternativa para apoyar la recuperación funcional en personas con lesiones neurológicas, como el accidente cerebrovascular (ACV), lesiones medulares o enfermedades neurodegenerativas.

En ese contexto, el sistema Emotiv EPOC, que trabaja con la adquisición no invasiva de señales electroencefalográficas (EEG), ha mostrado un buen potencial para neurorehabilitación, porque permite interpretar la intención motora del usuario y usarla para controlar actuadores robóticos.

En la primera versión del proyecto desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana (Gutiérrez Ortiz & Pomaquiza Chiriboga, 2025), se logró integrar un guante robótico y una minibike terapéutica controlados mediante señales EEG, obteniendo resultados iniciales que demostraron que la idea es viable.

Durante las pruebas se identificaron limitaciones técnicas en la estabilidad de la comunicación, en la precisión con la que se interpretan las señales y en la falta de soporte para trabajar con otros actuadores. Por eso surge la necesidad de desarrollar una segunda versión del sistema, incorporando una órtesis de codo y optimizando la estructura electrónica y mecánica, para ampliar su aplicación terapéutica y lograr una respuesta más consistente.

## 2. Problema

### 2.1. Antecedentes

El ACV suele aparecer de manera repentina y puede cambiar por completo la vida de una persona y la de su familia. En muchos casos deja debilidad o menos control en un lado del cuerpo y eso afecta acciones tan comunes como sostener un vaso, abotonarse una camisa o caminar. La recuperación considera realizar ejercicios y repetir movimientos muchas veces, con constancia, paciencia y el apoyo de un profesional. Por eso, es clave contar con herramientas que mantengan la terapia activa, que motiven al paciente y que permitan medir

avances, sobre todo cuando el tiempo del terapeuta o el acceso a sesiones frecuentes es limitado.

Con el objetivo de aportar al desarrollo de tecnología para rehabilitación se realizó la primera versión del sistema y se identificaron fallas en la sincronización entre las señales EEG y la respuesta de los actuadores. Esto demostró la necesidad de rediseñar el sistema para que sea más estable, flexible y eficiente.

El trabajo previo de Gutiérrez y Pomaquiza (2025) permitió validar la integración del Emotiv EPOC con un sistema robótico controlado mediante el software HITIBrain. Sin embargo, también se identificó que depender de una conexión por radiofrecuencia generaba interferencias, y que la estructura del sistema era rígida, lo cual dificultaba incorporar nuevos actuadores. Esta primera versión funcionó como una base experimental importante, porque permitió detectar con claridad los aspectos críticos que ahora se buscan mejorar en esta propuesta.

## **2.2. Importancia y alcances**

El rediseño del sistema permitirá optimizar la funcionalidad del sistema, ampliando su alcance clínico e investigativo. La incorporación de una órtesis de codo facilitará la ejecución de movimientos controlados, mejorando la eficiencia de la rehabilitación en extremidades superiores. Este desarrollo contribuirá al fortalecimiento de la investigación biomédica aplicada en la UPS, favoreciendo la transferencia tecnológica hacia la salud.

## **2.3. Delimitación**

El proyecto se desarrolló en el GIIB, en el laboratorio de Ingeniería Clínica y Hospitalaria de la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca, en un periodo estimado de cinco meses (desde octubre de 2025 hasta febrero de 2026), comprendiendo las etapas de evaluación, rediseño, integración de la órtesis y pruebas funcionales del prototipo.

# **3. Objetivos**

## **3.1. Objetivo general**

- Rediseñar un módulo electrónico para el control de un sistema de rehabilitación motora robótica con Emotiv EPOC.

### **3.2. Objetivos específicos**

- Evaluar el funcionamiento y desempeño de la primera versión del sistema de rehabilitación motora robótica controlada por Emotiv EPOC.
- Rediseñar la arquitectura electrónica, mecánica y de control del sistema, implementando mejoras en la estabilidad y la comunicación EEG-actuadores.
- Integrar una órtesis de codo en el nuevo diseño, asegurando compatibilidad estructural y funcional con los módulos existentes.
- Realizar pruebas experimentales del sistema para validar su funcionamiento y efectividad en la asistencia del movimiento del miembro superior.

## **4. Hipótesis**

### **4.1. Hipótesis general**

- El módulo rediseñado para el sistema de rehabilitación con Emotiv EPOC mejorará la estabilidad, precisión y eficacia en comparación con la primera versión.

### **4.2. Hipótesis específicas**

- El ajuste de la comunicación entre el Emotiv EPOC y los actuadores disminuirá retrasos y desincronizaciones, logrando respuestas más coherentes con la intención del usuario.
- La incorporación de la órtesis de codo ampliará la asistencia del miembro superior al incluir movimientos de flexión-extensión dentro de la terapia.
- La segunda versión ofrecerá un desempeño superior al de la primera en sesiones de rehabilitación, tanto en funcionamiento como en experiencia de uso.

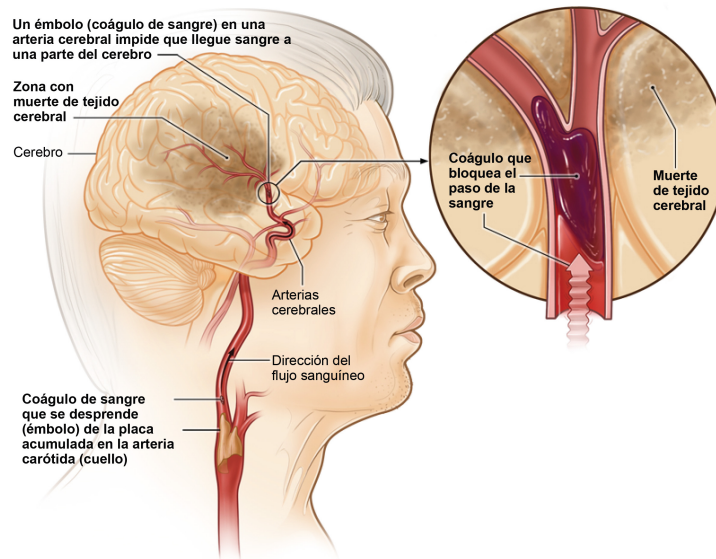
## **5. Marco teórico**

Un accidente cerebrovascular (ACV) ocurre cuando se interrumpe o disminuye de forma significativa el flujo sanguíneo que llega al cerebro. En ese momento, el tejido cerebral deja de recibir oxígeno y nutrientes (ver Figura 1), lo que puede desencadenar un daño neurológico en pocos minutos. Alrededor de cinco minutos de isquemia pueden ser suficientes para producir

infarto cerebral. Además del “corte” de energía, se activa una cascada bioquímica asociada a excitotoxicidad mediada por glutamato, acidosis y edema citotóxico, procesos que empeoran la lesión si no se actúa a tiempo (Kuriakose & Xiao, 2020).

## Figura 1

*Accidente cerebrovascular (ACV).*



Nota. Causas y factores de riesgo | NHLBI, NIH. (2023, 17 julio). NHLBI, NIH.  
<https://www.nhlbi.nih.gov/es/salud/accidente-cerebrovascular/causas>.

En la práctica clínica, el ACV suele clasificarse en dos grandes tipos. El ACV isquémico, relacionado con una obstrucción del flujo, es el más frecuente (aprox. 87%), mientras que el hemorrágico, asociado a ruptura vascular y sangrado intracraneal, representa cerca del 13%. Esta distinción importa porque cambia el abordaje médico y también el pronóstico funcional, especialmente en fases tempranas de recuperación (Mesonero & Sánchez, 2019).

### 5.1. Neuroplasticidad y recuperación motora

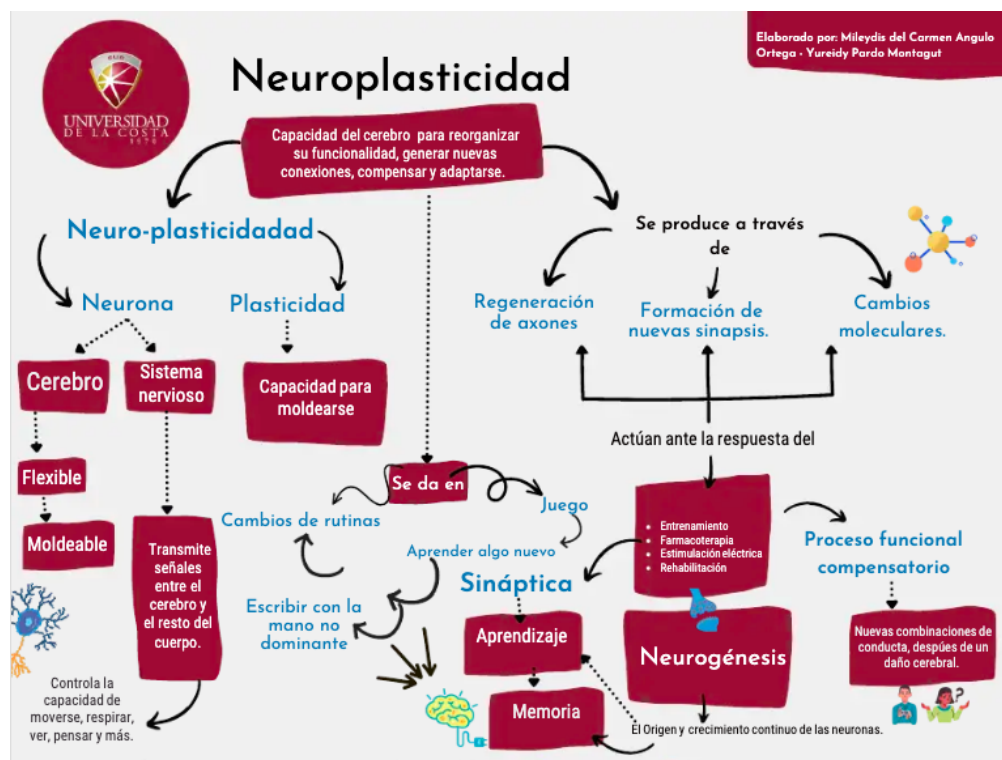
La neuroplasticidad es la capacidad que tiene el sistema nervioso para adaptarse y reorganizarse según lo que la persona practica (Bach-y-Rita & Bach-y-Rita, 1997). Después de un ACV, este concepto es muy importante porque ayuda a entender por qué la recuperación motora sí puede ocurrir aunque haya existido daño en el cerebro: con el tiempo y el entrenamiento, el cerebro puede aprender otra vez ciertos movimientos, reforzando nuevas conexiones y usando

rutas alternativas (Cramer & Sur, 2019; Kolb & Gibb, 2020).

Por eso, la rehabilitación no se trata solamente de fortalecer músculos, sino de entrenar al cerebro mediante tareas repetidas que generan intención de movimiento y una respuesta que el paciente puede percibir. En la Figura 2 se muestra un diagrama sobre la neuroplasticidad. Estudios con neuroimagen muestran que cuando se realizan ejercicios motores específicos, aumenta la actividad cerebral y se fortalecen conexiones en las zonas relacionadas con el movimiento, y eso se asocia con mejoras clínicas en lo motor y sensorial (Cramer & Sur, 2019). Esto explica por qué en terapia se insiste en la repetición, la intensidad y la retroalimentación, que son factores que ayudan a que el cerebro haga cambios útiles y sostenidos.

**Figura 2**

*Diagrama de Neuroplasticidad.*



Nota. Client challenge. (s. f.).

<https://www.scribd.com/document/697840736/Neuroplasticidad-Mapa-conceptual>.

Otro punto clave es el tiempo porque después de un ACV en la cual el cuerpo y el cerebro responden mejor a la rehabilitación. En ese periodo se puede llegar a ver la mayor parte de

la recuperación funcional, incluso alrededor del 78% de las mejoras (Caunedo Suárez, 2023). Eso no quiere decir que después ya no se pueda mejorar, pero sí que en esos primeros meses normalmente se aprovecha más la terapia y se ven avances más rápidos.

## **5.2. Rehabilitación post-ACV y enfoque terapéutico moderno**

La rehabilitación después de un ACV es una parte esencial del tratamiento y casi siempre se trabaja con una mezcla de terapia física, terapia ocupacional y práctica de actividades específicas del día a día. Según los estudios, hacer ejercicios repetitivos, trabajar con más intensidad y usar tecnologías de apoyo puede ayudar a recuperar funciones como el movimiento del brazo y la marcha (Langhorne et al., 2011).

Algo clave es que la rehabilitación busca mejorar el desempeño funcional: coordinación, fuerza útil, control del movimiento y capacidad para tareas cotidianas. Los dispositivos tecnológicos se vuelven valiosos cuando aumentan repetición, control del ejercicio, y permiten medir mejor el desempeño.

La rehabilitación robótica se ha vuelto una opción bastante útil, porque hace que la terapia sea más precisa y se pueda adaptar a lo que cada paciente necesita (Lum et al., 2012) . Estos dispositivos ayudan a repetir movimientos muchas veces, lo cual es clave para recuperar el control motor y apoyar el proceso de aprendizaje del cerebro. Además, varios sistemas dan una respuesta inmediata durante el ejercicio, lo que refuerza el aprendizaje y ayuda a mejorar progresivamente (Mehrholz et al., 2020).

En la Tabla 1 se presenta una comparación entre la rehabilitación tradicional y la rehabilitación robótica para conocer sus ventajas.

**Tabla 1***Comparación entre rehabilitación tradicional y rehabilitación robótica.*

| <b>Aspecto</b>                  | <b>Rehabilitación Tradicional</b>                                                                                                                                                                                    | <b>Rehabilitación Robótica</b>                                                                                                                                                               |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Eficiencia                      | Dependiente de la habilidad del terapeuta y la motivación del paciente. Los avances pueden ser más lentos.                                                                                                           | Mejora la eficiencia al permitir ejercicios repetitivos sin necesidad de intervención constante del terapeuta. La tecnología ofrece un seguimiento en tiempo real del progreso del paciente. |
| Repetitividad de los ejercicios | Limitada, ya que la cantidad de repeticiones depende del terapeuta y del tiempo disponible. Los pacientes pueden no ser capaces de realizar un número suficiente de repeticiones para maximizar la neuroplasticidad. | Permite repetir ejercicios muchas veces en sesiones sin fatiga o variabilidad en la calidad de las repeticiones, lo que aumenta la neuroplasticidad y mejora la recuperación funcional.      |
| Control del movimiento          | Depende de la capacidad del paciente para realizar los movimientos con la asistencia de un terapeuta. Puede haber un control limitado sobre el movimiento asistido.                                                  | El sistema robótico controla precisamente el movimiento y proporciona retroalimentación sensorial al paciente, asegurando movimientos controlados y consistentes.                            |
| Adaptabilidad                   | Adaptación limitada a los cambios en las condiciones del paciente o del tratamiento. Requiere ajustes manuales.                                                                                                      | El sistema robótico puede ajustar automáticamente el tipo y la intensidad del ejercicio en función de los avances y la capacidad del paciente, lo que lo hace más flexible y adaptable.      |

Nota. Elaboración propia con base en Langhorne et al. (2011) y Veerbeek et al. (2017).

### **5.3. Emotiv EPOC**

El dispositivo Emotiv EPOC se utiliza para adquirir, visualizar y procesar señales EEG en tiempo real, permitiendo convertir la actividad cerebral del usuario en información útil para análisis e incluso para el control de sistemas como interfaces cerebro-computadora (Emotiv Systems, 2019) .

### 5.3.1. Interfaces cerebro-computadora (BCI)

Una interfaz cerebro-computadora (BCI) intenta convertir la actividad del cerebro en órdenes para controlar un dispositivo externo. En rehabilitación esto es muy interesante, porque ayuda a conectar la intención de movimiento con un movimiento asistido, incluso cuando el paciente todavía no puede hacer ese gesto por sí solo (Wolpaw et al., 2002).

En las BCI no invasivas, lo más común es usar EEG, un sistema BCI funciona por etapas: primero se capta la señal, luego se limpia o se prepara, después se sacan características importantes, se clasifica y finalmente se genera un comando para controlar el sistema (Mridha et al., 2021).

El combinar señales EEG con actuadores robóticos puede ayudar a que la rehabilitación sea más eficiente, porque permite que el paciente controle dispositivos de asistencia usando su actividad cerebral. El equipo capta señales EEG que se relacionan con la intención motora y las convierte en comandos que activan los actuadores (Pfurtscheller et al., 2010).

#### Figura 3

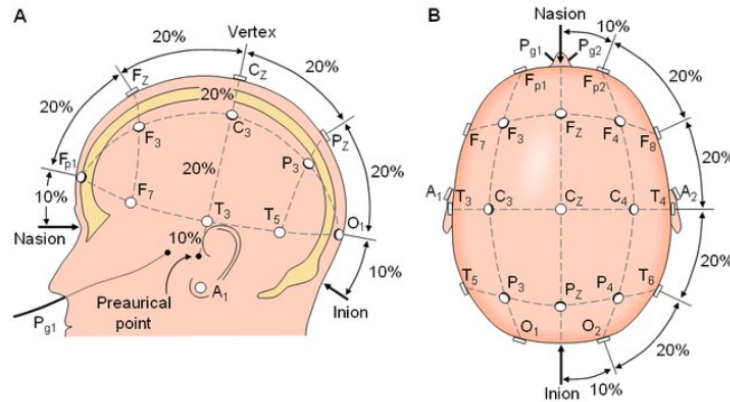
*Emotiv EPOC X.*



El Emotiv EPOC X que se muestra en la Figura 3 es un dispositivo de EEG que tiene 14 electrodos colocados según el sistema internacional 10-20 (ver Figura 4). Se usa en investigación y en proyectos clínicos porque es más accesible, relativamente fácil de usar y permite captar señales cerebrales de forma no invasiva. Además, como es inalámbrico y cómodo, se adapta bien a entornos como centros de rehabilitación e incluso hogares, por lo que suele ser una opción práctica y de menor costo para este tipo de proyectos (López-Larraz, Pons, & Montoya, 2020).

## Figura 4

*Sistema Internacional 10-20 para la colocación de los electrodos extracraneales.*



En rehabilitación robótica, se han visto resultados interesantes cuando se integra con actuadores porque el paciente puede interactuar con el sistema a partir de su intención motora y eso activa una respuesta del dispositivo (Bastos-Filho et al., 2025). Esa retroalimentación entre el cerebro y el actuador puede ayudar al proceso de rehabilitación, ya que favorece la neuroplasticidad y la mejora de la función motora (Kim, Park, & Lee, 2022).

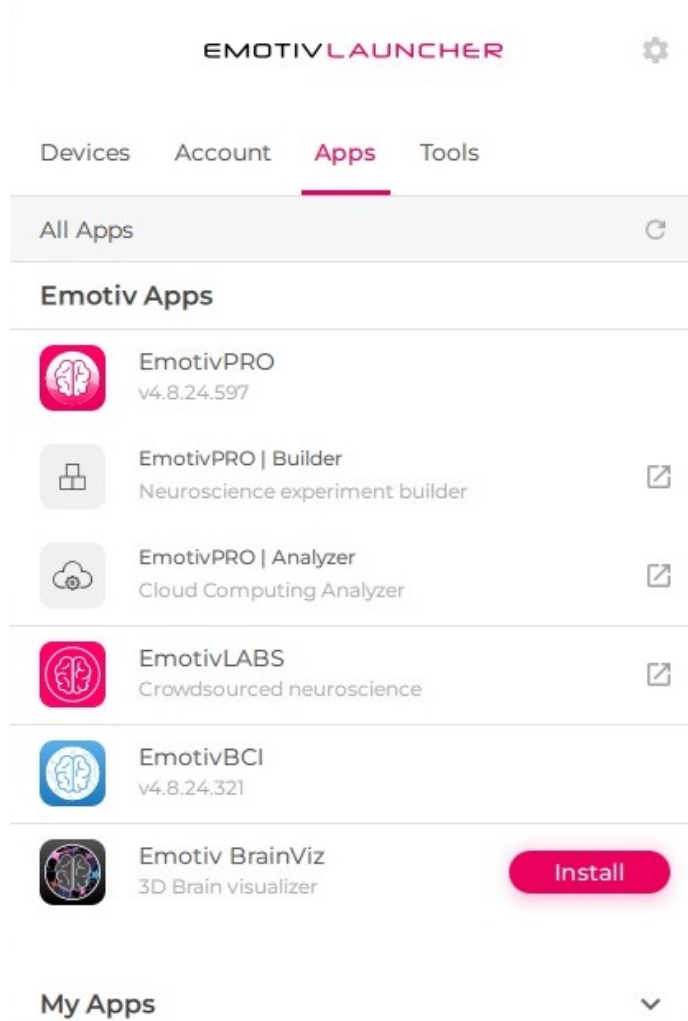
El Emotiv también tiene limitaciones ya que la señal no tiene la misma resolución que equipos de EEG más avanzados y puede verse afectado por interferencias electromagnéticas, especialmente en lugares no controlados. Aun así, por su relación costo-beneficio, suele ser una alternativa viable para proyectos de rehabilitación cuando los recursos son limitados (Heo et al., 2022).

### 5.3.2. Emotiv Launcher

Emotiv Launcher es la aplicación de escritorio que sirve como punto de inicio para usar EMOTIV. (EMOTIV, s. f.). En la Figura 5 se muestra la Emotiv Launcher App.

**Figura 5**

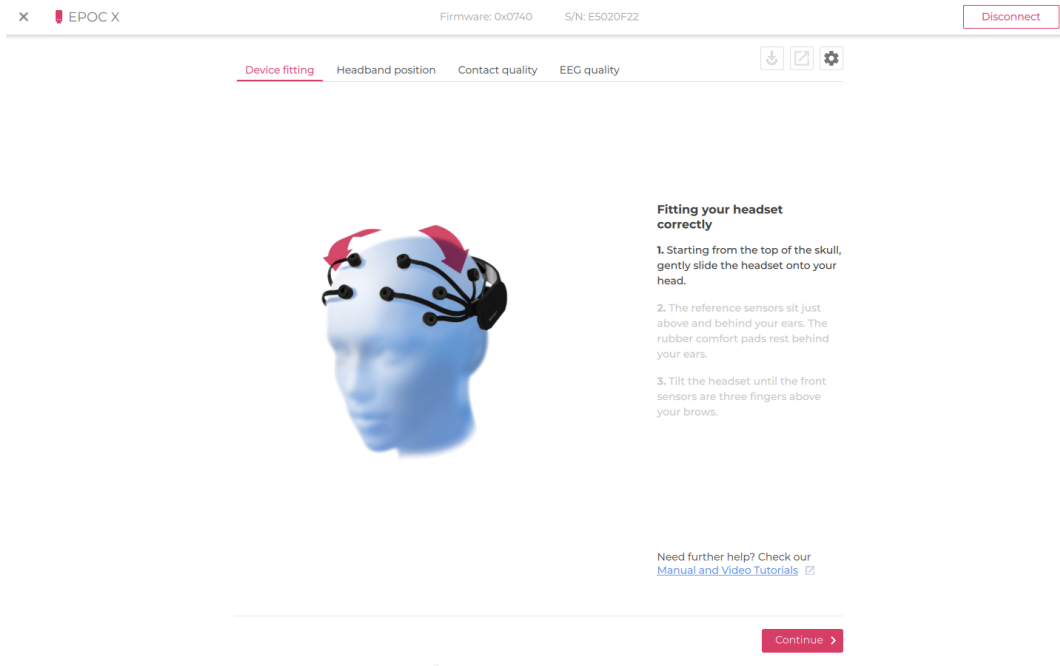
*Emotiv Launcher App.*



La opción *device fitting* guía el ajuste del casco para lograr un buen contacto de los sensores y mejorar la calidad de la señal que se verifica a través de la interfaz que se muestra en la Figura 6.

## Figura 6

### *Ajuste del dispositivo Emotiv EPOC X.*

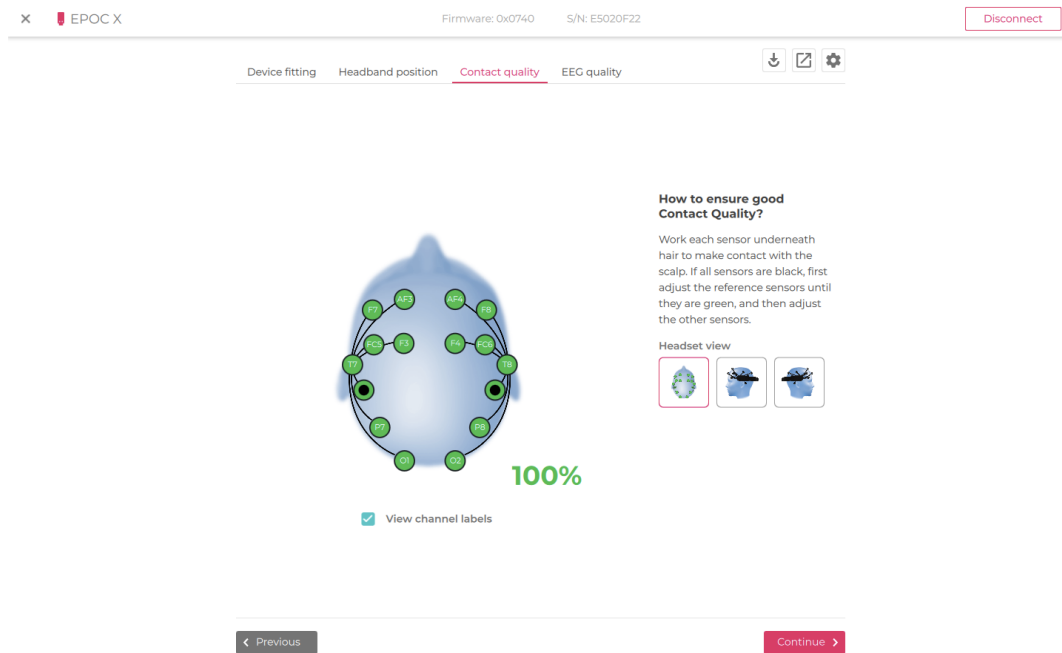


La *headband position* es la posición seleccionada de la banda, que se usa para interpretar correctamente los datos del sensor de movimiento ubicado en el casco.

*Contact Quality Map*, muestra en tiempo real la calidad de contacto de cada sensor. Si el contacto es malo, la señal sale con ruido y se vuelve inestable lo que afecta cualquier detección o clasificación. El mapa de calidad que se muestra en la Figura 7, se usa como una verificación previa, como un chequeo rápido antes de iniciar la sesión (EMOTIV, 2021).

## Figura 7

Mapa de calidad de contacto.



*Contact Quality Map* muestra cómo está el contacto de los sensores usando colores (por ejemplo, verde si está bien, naranja si es regular y rojo si está mal).

La *EEG Quality* es un indicador general de la señal, promedia la calidad de todos los sensores y se ve en tiempo real también con colores como rojo, naranja y verde.

### 5.3.3. Cortex API

El Cortex API permite conectar el software con EMOTIV. La aplicación se comunica con Cortex enviando y recibiendo mensajes JSON por un WebSocket.

La conexión se hace en localhost por el puerto 6868 y debe ser con WebSocket Secure (wss), porque no aceptan conexión sin cifrado (ws) (EMOTIV, 2025b).

Antes de recibir datos en tiempo real, el proceso tiene los siguientes pasos: primero se debe iniciar sesión en Emotiv Launcher, luego verificar los datos de la app (application ID, client ID y client secret), después acceder con requestAccess y aprobar en Launcher. Se conecta así el headset y finalmente se obtiene un token que sirve para las siguientes solicitudes.

## **5.4. Actuadores para la rehabilitación**

En un sistema de rehabilitación robótica, los actuadores son los que generan el movimiento y se encargan de ejecutar acciones físicas en el paciente, ya sea ayudando a mover, guiando el movimiento o brindando estímulos.

Son útiles en rehabilitación porque permiten repetir los ejercicios de forma constante, mantener una intensidad más controlada y evitar tanta variación comparada con la forma manual (Veerbeek et al., 2017).

A nivel clínico, esa repetición ayuda a reforzar patrones de movimiento y apoya la recuperación. Y desde el lado de ingeniería, hay que integrarlos con cuidado para que funcionen de forma segura y predecible, y que respondan bien al sistema de control, especialmente si se activan usando bioseñales (Bucher et al., 2018).

### **5.4.1. Guante robótico Tongboshi**

El guante robótico Tongboshi que se muestra en la Figura 8 es un dispositivo que sirve para apoyar la rehabilitación de la mano, sobre todo en pacientes que tienen dificultad para mover los dedos por su cuenta (Tongboshi Rehabilitation, 2021). Básicamente, ayuda a hacer los movimientos más básicos de los dedos, como doblar y estirar (flexión y extensión), para que la persona pueda repetir esos ejercicios incluso cuando no tiene mucha fuerza o control motor.

## Figura 8

*Guante robótico Tongboshi.*



Nota. Tongboshi Rehabilitation. (2021). Robotic hand rehabilitation glove: Product description and clinical application. Tongboshi Medical Technology Co., Ltd.

Estos guantes se usan para ayudar en el reaprendizaje del movimiento, porque permiten que los dedos sigan moviéndose y el paciente participe más en la terapia. Al dar una ayuda mecánica controlada, el guante puede disminuir la rigidez, evitar que las articulaciones se vayan limitando y reforzar la conexión entre querer mover la mano y ver que el movimiento realmente ocurre (Tongboshi Rehabilitation, 2021).

### 5.4.2. Minibike RYGeo

El Minibike RYGeo que se muestra en la Figura 9 es un equipo de pedaleo asistido que se usa en rehabilitación y en entrenamiento motor. Aunque normalmente se lo relaciona con ejercicios para las piernas, también puede servir como una herramienta para activar el movimiento en general, sobre todo en personas que tienen movilidad reducida o que recién están empezando su recuperación (RYGeo Medical, 2020).

## Figura 9

*Minibike RYGeo.*



Nota. RYGeo Medical. (2020). Minibike RYGeo: Assisted pedaling device for rehabilitation and motor training. RYGeo Medical Equipment.

El pedaleo es un movimiento repetitivo y constante, que ayuda a que varios músculos trabajen de forma coordinada. Además, ayuda a mantener las articulaciones en movimiento para que no se pongan rígidas. En la parte neurológica, este tipo de ejercicio rítmico puede ayudar a “reactivar” patrones de movimiento más automáticos y, con el tiempo, aportar a mejorar la coordinación y la resistencia (Klarner & Zehr, 2018).

### 5.4.3. Órtesis de codo ZB-S1001

La órtesis de codo (ver Figura 10) es un dispositivo que se usa para apoyar la rehabilitación del brazo, sobre todo en los movimientos de doblar y estirar el codo. Es común en personas que, después de una lesión neurológica como un ACV, tienen dificultad para controlar ese movimiento por sí solas (Loureiro et al., 2014). La idea no es obligar al brazo a moverse, sino acompañar el movimiento de forma segura y darle una guía para que el paciente pueda participar en la terapia según sus capacidades.

## Figura 10

*Órtesis de codo ZB-S1001.*



Nota. Elbow flexion and extension training equipment arm upper limb rehabilitation bending and straightening exercise Home - AliExpress 18. (s. f.). Aliexpress.

<https://es.aliexpress.com/i/1005006276515961.html>.

Normalmente trabaja con un rango de movimiento controlado, que cubre lo necesario para ejercicios básicos. Esto ayuda a que el codo no se quede rígido y a mantener la movilidad, que es importante al inicio de la recuperación, cuando pasar mucho tiempo sin mover el brazo puede empeorar la limitación (Langhorne et al., 2011).

Suele ser ajustable para adaptarse a diferentes tamaños de brazo y mantener alineada la articulación. También se busca que sea cómoda, con acolchado y correas regulables, porque si el dispositivo molesta, la persona se cansa más rápido y es más difícil mantener la terapia constante.

Otro punto importante es que muchas órtesis permiten regular la velocidad o el nivel de asistencia. Así se puede empezar con movimientos o asistidos y, poco a poco, subir el nivel cuando el paciente vaya recuperando control. Además, los seguros y temporizadores ayudan a que el uso sea seguro para evitar movimientos bruscos o sobrecargas.

## 5.5. Primera versión del sistema de rehabilitación robótica controlado por Emotiv EPOC

La primera versión del sistema de rehabilitación robótica controlado con Emotiv EPOC, que se hizo como un trabajo previo en la Universidad Politécnica Salesiana (ver Figura 11), sirvió para demostrar que sí se pueden usar señales EEG para controlar dispositivos que ayudan al movimiento. En ese proyecto se usó el casco Emotiv para captar la actividad cerebral del usuario y convertirla en comandos que activaban los actuadores durante los ejercicios. Esto mostró que una interfaz cerebro-computadora puede conectar lo que la persona intenta hacer con un movimiento asistido, algo muy útil en rehabilitación (Gutiérrez Ortiz & Pomaquiza Chiriboga, 2025). En las pruebas se identificó que el sistema a veces no era estable, el módulo electrónico no respondía siempre igual y la comunicación entre la señal EEG y los actuadores podía fallar, sobre todo cuando la señal salía con ruido o cuando las sesiones duraban más tiempo.

### Figura 11

*Módulo del primer sistema de rehabilitación robótica.*



Por eso, en este trabajo se propone mejorar el sistema planteando un rediseño del módulo electrónico, revisar cómo funcionó la primera versión ayuda a identificar lo que se debe corregir, tanto en el hardware y software y en la forma en la que el sistema toma decisiones. Además, se busca incluir una órtesis de codo al sistema. El objetivo es obtener un sistema completo, que se pueda considerar como apoyo tecnológico en terapias de rehabilitación motora.

## 6. Marco metodológico

Este trabajo se centra en mejorar y validar un sistema de rehabilitación motora robótica controlado con el Emotiv EPOC. Primero se evaluó la primera versión para identificar qué

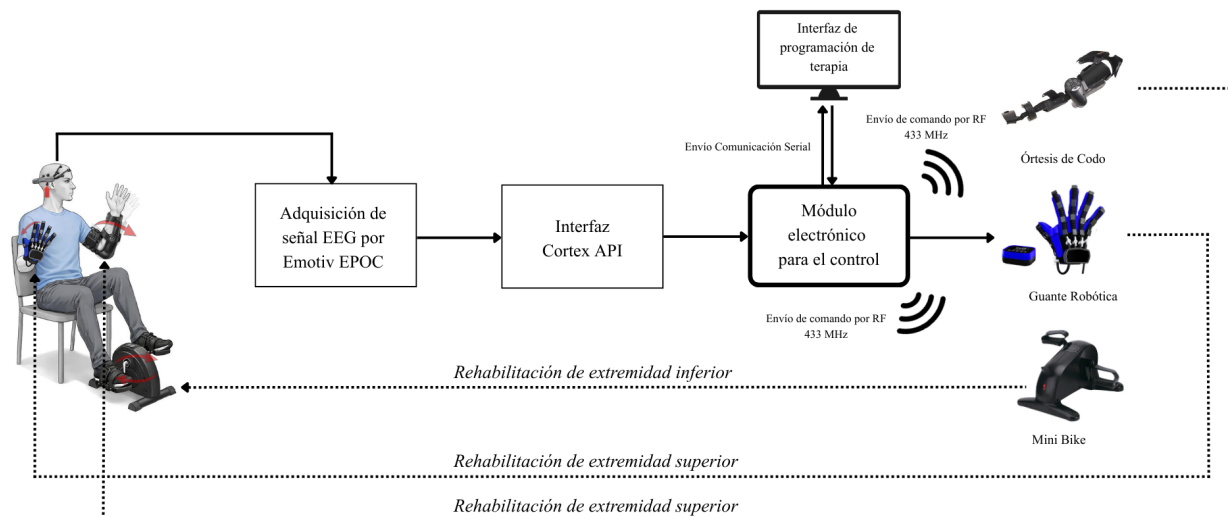
fallaba y qué se podía mejorar. Luego se rediseñó e implementó un nuevo módulo electrónico para que el sistema sea más estable y la comunicación con los actuadores sea más confiable. También se integró una órtesis de codo y se realizaron pruebas técnicas para comprobar que todo funcione correctamente.

## 6.1. Diagrama de bloques del módulo

El diagrama de bloques del módulo presentado en la Figura 12 permite visualizar de forma general la arquitectura del sistema y la relación entre sus principales componentes.

**Figura 12**

*Diagrama de bloques del sistema propuesto.*



En este esquema se muestra el flujo que sigue la señal desde la adquisición de la actividad EEG mediante el dispositivo Emotiv EPOC, su procesamiento a través de la interfaz Cortex API y su interpretación dentro de la aplicación de control. El módulo electrónico genera los comandos necesarios para activar los distintos actuadores del sistema, como la órtesis de codo, el guante robótico y la minibike. También se incorpora la interfaz de programación de terapia, la cual permite configurar el funcionamiento del sistema, facilitando una integración entre la intención del usuario, el procesamiento de la señal y la ejecución del movimiento del miembro superior e inferior.

## 6.2. Evaluación del primer prototipo

El primer prototipo trabaja con un modo manual (modo 1) y un modo automático (Modo 2). En el modo 1 el usuario elige cuando los actuadores se activan, es decir el usuario puede activar el sistema tantas veces como desee dentro de un tiempo asignado. El orden de trabajo considera tres condiciones: (1) guante, (2) minibike y (3) guante + minibike. En el modo 2 una interfaz indica cuando el usuario pedira el inicio de funcionamiento del actuador. Aquí las activaciones se guían por un estímulo visual que indica el momento que se debe generar el comando. El prototipo también emplea el software HITIBrain para identificar los gestos de *Smile*, *Clench teeth*, *Furrow brows*, *Raise brows* y *Laugh* en los usuarios que emplean el EPOC. Estos gestos son la base para que el sistema reconozca la intención de movimiento para activar los dispositivos robóticos.

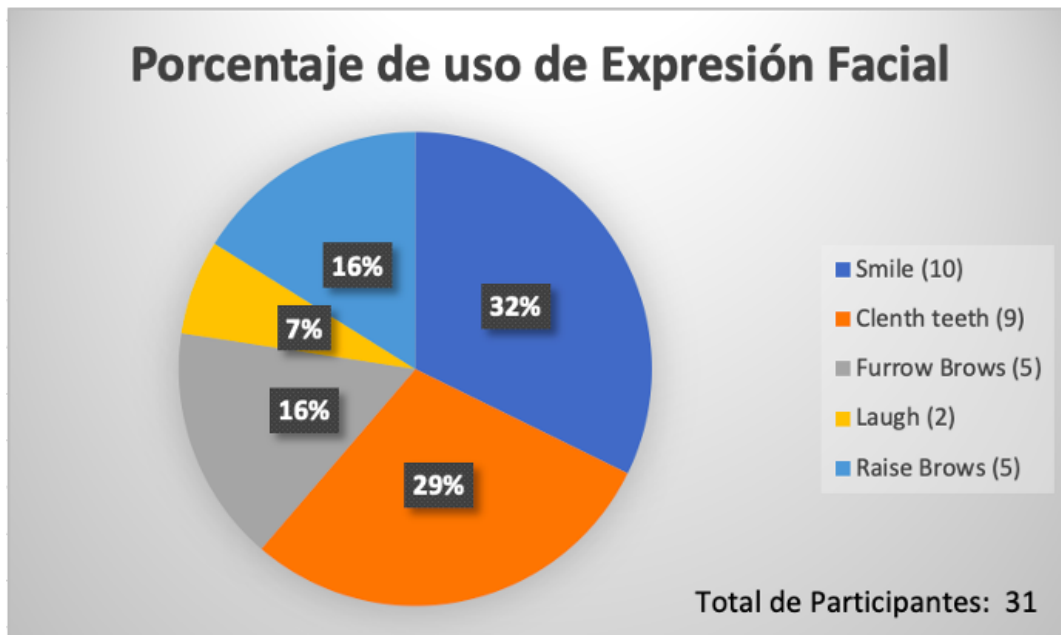
### 6.2.1. Participantes y protocolo de prueba

Para la validación técnica de la primera versión del sistema se realizaron pruebas con 31 participantes con los dos modos de trabajo. En ambos casos, el tiempo de terapia fue el mismo: 1 minuto por cada actuador (guante, minibike y guante + minibike) con un total de 6 minutos por sesión completa por participante. En el Modo 1 se analizó principalmente el número de activaciones voluntarias, mientras que en el Modo 2, guiado por estímulo visual, se evaluó el desempeño mediante el tiempo de reacción del sistema.

En la Figura 13 se observa que las expresiones más utilizadas por los participantes fueron *Smile* (32%) y *Clench teeth* (29%). En menor proporción se emplearon *Furrow brows* y *Raise brows* (16% cada una), mientras que *Laugh* fue la menos utilizada (6%). Estos resultados sugieren una preferencia por gestos sencillos y repetibles durante la terapia, coincidiendo además con aquellos que el sistema reconoce con mayor estabilidad.

**Figura 13**

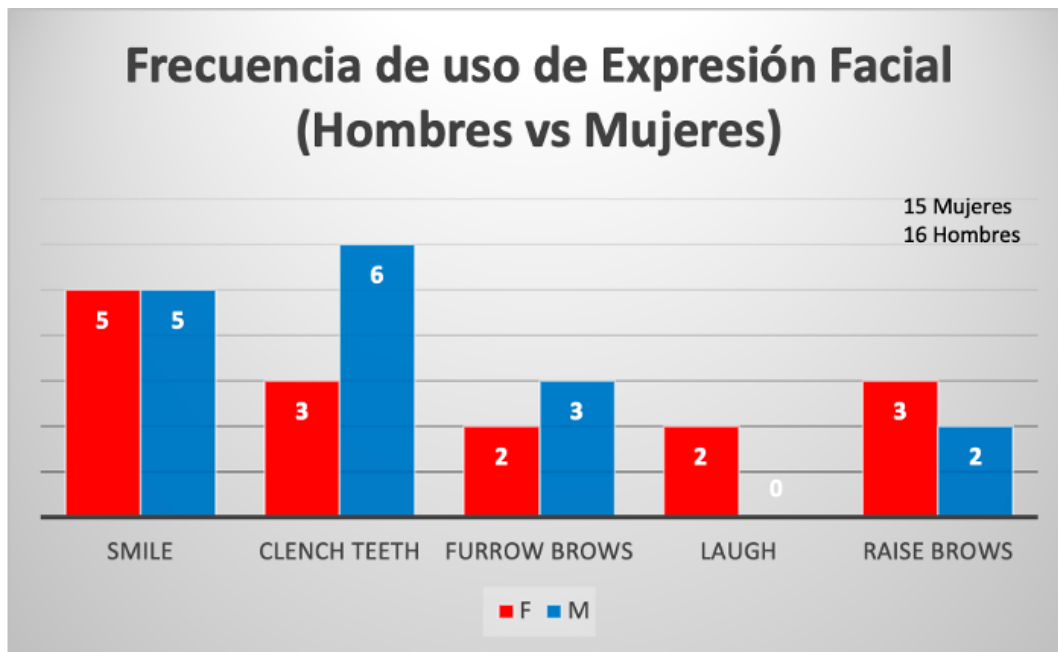
*Porcentaje de uso de expresión facial.*



Al analizar los comandos por sexo (Figura 14), en el grupo de mujeres la expresión más usada fue *Smile*, seguida de *Clench teeth* y *Raise brows*. En los hombres predominó *Clench teeth*, seguido de *Smile*, mientras que *Laugh* no se utilizó.

**Figura 14**

*Frecuencia de uso de expresión facial entre mujeres y hombres.*

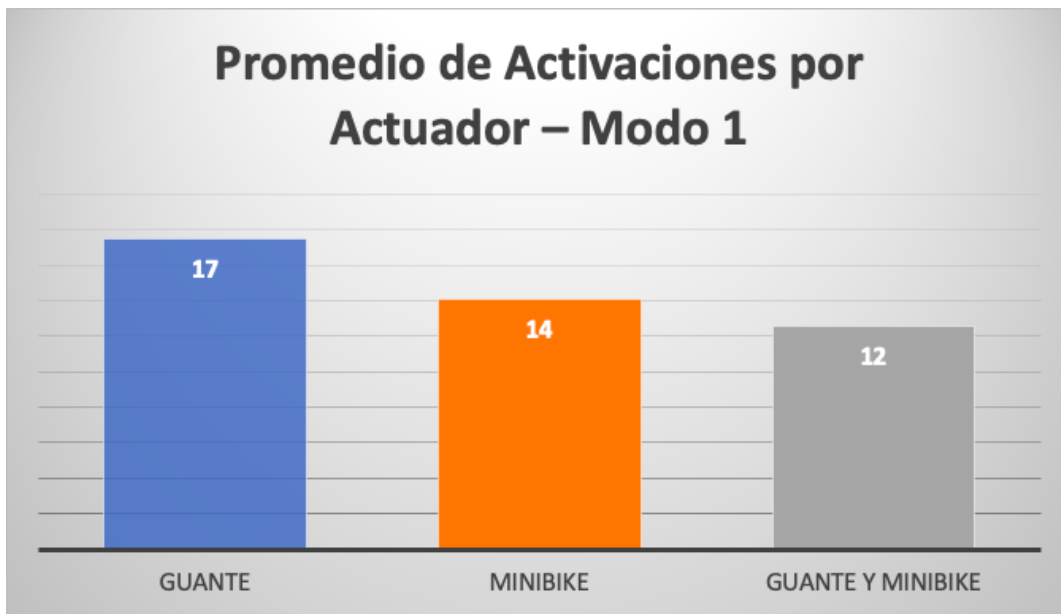


### 6.2.2. Desempeño del sistema en Modo 1 (control voluntario)

En la Figura 15 se aprecia que el guante presentó el mayor promedio de activaciones (17 por minuto), seguido de la minibike (14) y la condición combinada (12). Esto sugiere que, con libertad total, los participantes tienden a interactuar más con el actuador del miembro superior, posiblemente por ser más natural e intuitivo.

**Figura 15**

*Promedio de activaciones por actuador en el Modo 1.*

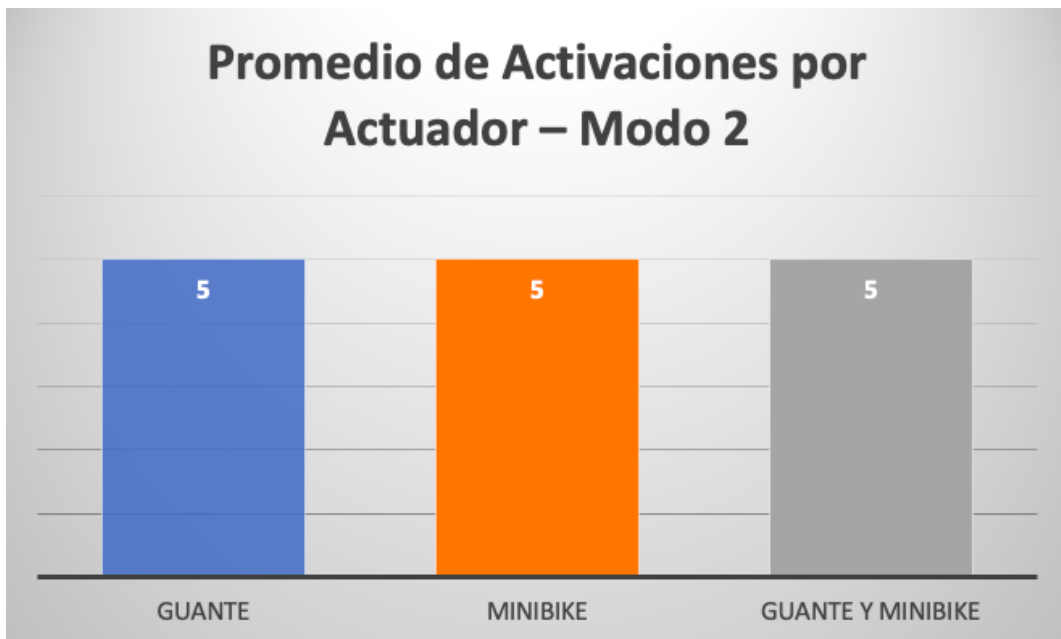


### **6.2.3. Desempeño del sistema en Modo 2 (control guiado)**

En el Modo 2 también se trabajó 1 minuto por actuador, debido a que el protocolo limita las oportunidades de respuesta. Las activaciones promedio se mantuvieron cercanas entre sí, alrededor de 5 activaciones por minuto para guante, minibike y guante + minibike (Figura 16).

**Figura 16**

*Promedio de activaciones por actuador en el Modo 2.*

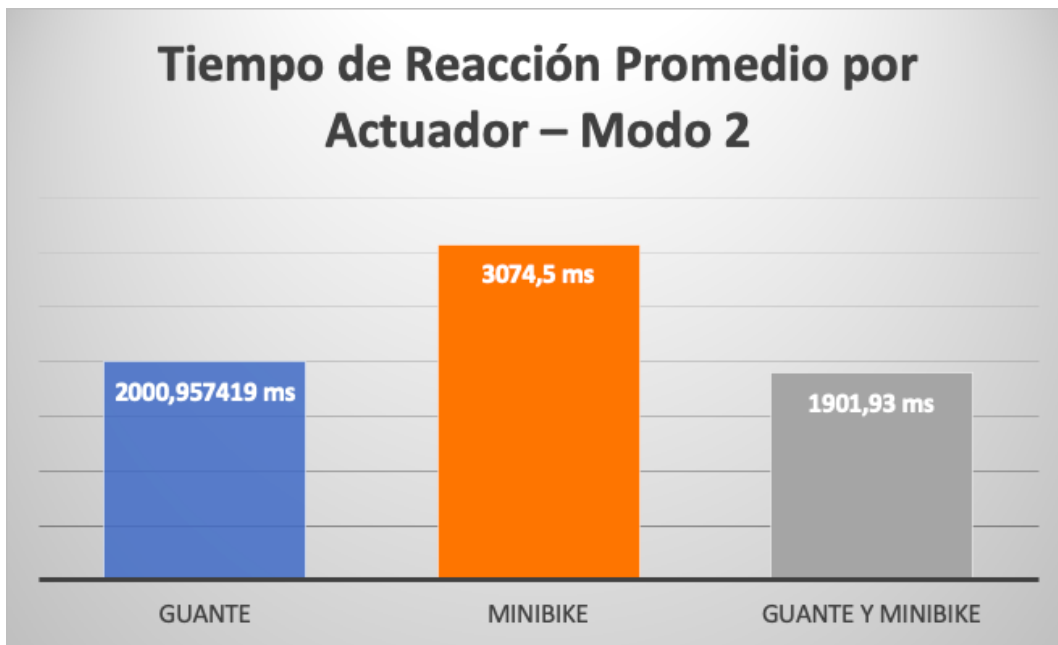


#### **6.2.4. Tiempo de reacción en Modo 2**

En cuanto al tiempo de reacción (Figura 17), el sistema mostró promedios aproximados de 2001 ms para el guante, 3075 ms para la minibike y 1902 ms para la combinación de ambos actuadores. Se observó una respuesta más rápida en el guante y en la condición combinada, mientras que la minibike presentó tiempos mayores, lo cual podría ser por la falla en la comunicación de radio frecuencia.

**Figura 17**

*Tiempo de reacción promedio por actuador en el Modo 2.*

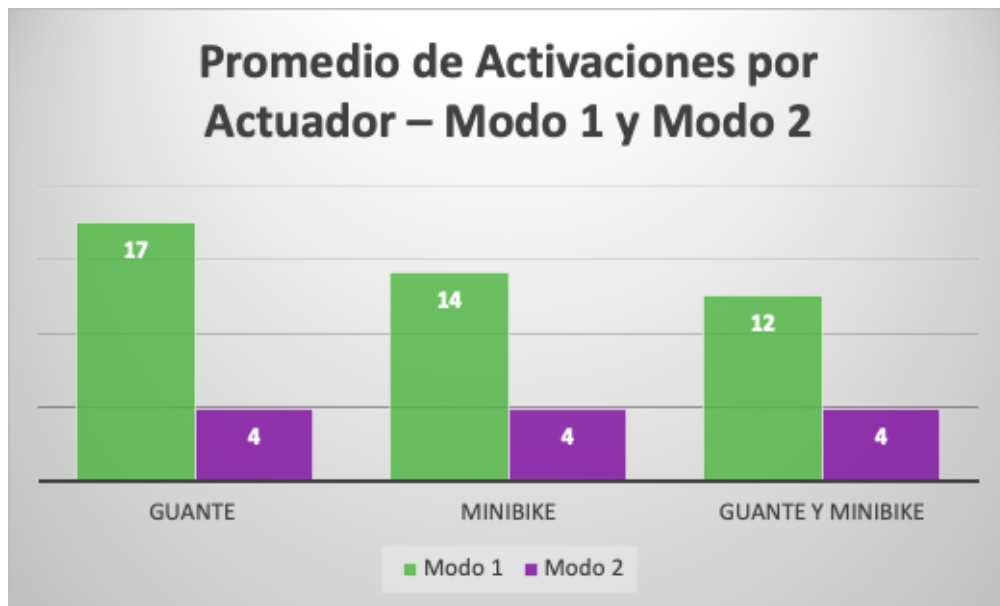


#### **6.2.5. Comparación entre Modo 1 y Modo 2**

Aunque el tiempo de trabajo fue el mismo (1 minuto por actuador), la lógica de uso difiere entre modos. En Modo 1, al ser libre, los promedios de activación son mayores. En Modo 2, el ritmo lo define el estímulo visual, lo que reduce las activaciones alrededor de 5 por minuto. Por tanto, una menor cantidad de activaciones en Modo 2 no implica peor funcionamiento, sino un uso más estructurado y controlado.

**Figura 18**

*Comparación del promedio de activaciones por actuador entre Modo 1 y Modo 2.*



#### **6.2.6. Evaluación de usabilidad mediante SUS - Prototipo 1**

Para evaluar la usabilidad percibida del sistema se aplicó el cuestionario *System Usability Scale* (SUS) a los 31 participantes al finalizar la sesión. El SUS contiene 10 ítems tipo Likert (1 a 5). Las respuestas se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Respuestas completas del cuestionario SUS (P1–P31).*

| No. | Pregunta                                                                               | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | P17 | P18 | P19 | P20 | P21 | P22 | P23 | P24 | P25 | P26 | P27 | P28 | P29 | P30 | P31 |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1   | Me gustaría usar este sistema con frecuencia                                           | 3  | 5  | 4  | 5  | 3  | 4  | 4  | 4  | 5  | 3   | 2   | 4   | 3   | 4   | 3   | 5   | 4   | 5   | 5   | 5   | 4   | 5   | 3   | 5   | 2   | 5   | 5   | 5   | 4   | 3   | 4   |
| 2   | Encontré el sistema innecesariamente complejo                                          | 1  | 1  | 2  | 1  | 3  | 2  | 2  | 2  | 3  | 1   | 1   | 3   | 2   | 1   | 2   | 2   | 2   | 5   | 1   | 4   | 2   | 1   | 1   | 1   | 2   | 3   | 1   | 3   | 3   | 3   | 1   |
| 3   | Creo que el sistema fue fácil de usar                                                  | 4  | 5  | 3  | 5  | 4  | 5  | 4  | 4  | 5  | 5   | 5   | 4   | 3   | 5   | 2   | 5   | 4   | 5   | 5   | 5   | 4   | 5   | 5   | 5   | 4   | 4   | 4   | 5   | 3   | 5   | 4   |
| 4   | Creo que necesitaría apoyo técnico para usar este sistema                              | 2  | 3  | 5  | 4  | 5  | 2  | 5  | 3  | 5  | 1   | 4   | 4   | 5   | 3   | 5   | 3   | 2   | 4   | 5   | 5   | 3   | 3   | 3   | 3   | 1   | 2   | 2   | 3   | 5   | 1   | 1   |
| 5   | Las funciones del sistema estaban bien integradas                                      | 4  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 4  | 3  | 5  | 4   | 5   | 5   | 2   | 4   | 3   | 4   | 4   | 5   | 5   | 4   | 4   | 5   | 5   | 5   | 3   | 5   | 5   | 5   | 4   | 4   | 3   |
| 6   | Me pareció que había demasiada inconsistencia en el sistema                            | 2  | 1  | 3  | 1  | 4  | 1  | 1  | 3  | 1  | 4   | 1   | 2   | 4   | 4   | 2   | 4   | 2   | 1   | 5   | 5   | 3   | 1   | 1   | 1   | 4   | 3   | 1   | 2   | 4   | 2   | 3   |
| 7   | Imagino que la mayoría de las personas aprenderían a usar este sistema muy rápidamente | 3  | 5  | 4  | 5  | 4  | 4  | 3  | 4  | 5  | 5   | 5   | 3   | 4   | 4   | 4   | 4   | 5   | 5   | 5   | 5   | 4   | 5   | 5   | 5   | 2   | 5   | 5   | 5   | 3   | 5   | 4   |
| 8   | Me encontré el sistema muy engorroso de usar                                           | 2  | 5  | 3  | 1  | 1  | 1  | 3  | 3  | 3  | 1   | 1   | 2   | 5   | 2   | 2   | 1   | 2   | 1   | 1   | 5   | 3   | 1   | 1   | 5   | 3   | 1   | 4   | 2   | 4   | 2   | 1   |
| 9   | Me sentí confiado usando el sistema                                                    | 4  | 5  | 4  | 5  | 4  | 5  | 4  | 4  | 5  | 5   | 5   | 5   | 5   | 4   | 3   | 5   | 5   | 5   | 5   | 4   | 4   | 5   | 5   | 5   | 4   | 5   | 5   | 5   | 4   | 5   | 5   |
| 10  | Necesité aprender muchas cosas antes de poder usar el sistema                          | 1  | 2  | 2  | 1  | 4  | 1  | 3  | 2  | 1  | 1   | 1   | 2   | 2   | 1   | 4   | 2   | 1   | 2   | 1   | 4   | 3   | 1   | 2   | 2   | 2   | 1   | 3   | 1   | 3   | 2   | 1   |

Con base a las respuestas individuales, se concluye que la segunda versión del sistema requiere mejorar la complejidad del sistema y hacer más fácil de usar (preguntas 2 y 8 del SUS), esto se puede abordar incorporando un módulo con mejores indicaciones de uso. De igual manera es necesario disminuir inconsistencias del sistema (pregunta 6 del SUS).

La puntuación se calculó siguiendo el método estándar propuesto por Brooke: para ítems impares (1,3,5,7,9) se usa (respuesta – 1); para ítems pares (2,4,6,8,10) se usa (5 – respuesta). Luego se suman los 10 valores (0 a 40) y se multiplica por 2,5 para obtener un puntaje final de 0 a 100.

Además, para interpretar los valores obtenidos se clasificaron los puntajes según los rangos habituales: que se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3**

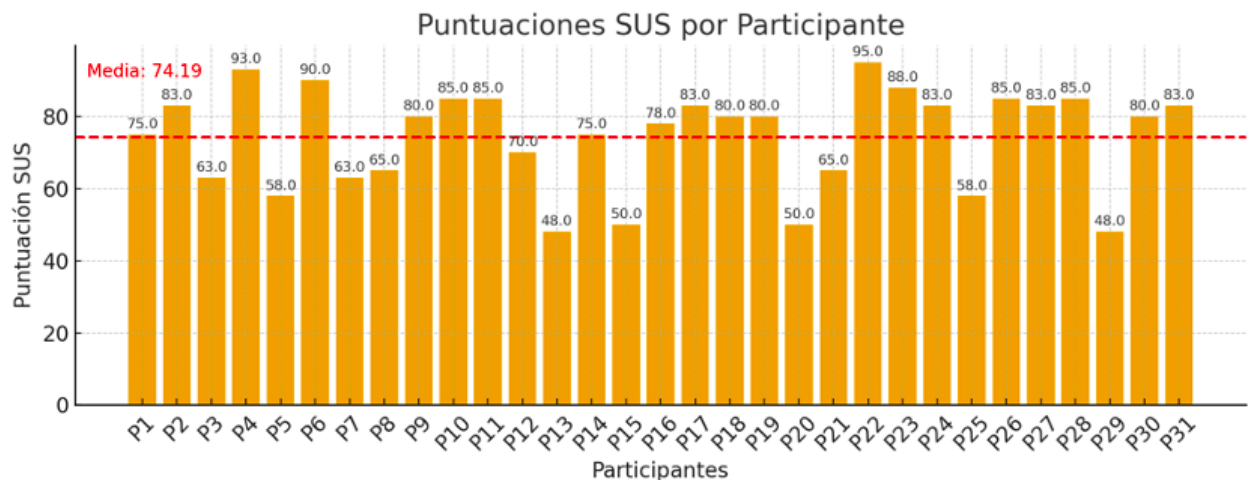
*Rangos de interpretación del puntaje SUS.*

| Rango SUS | Clasificación | Grado |
|-----------|---------------|-------|
| 0–25      | Muy pobre     | F     |
| 25–49     | Pobre         | D     |
| 50–67     | Aceptable     | C     |
| 68–79     | Buena         | B     |
| 80–100    | Excelente     | A     |

A partir de los puntajes individuales se obtuvieron estadísticos descriptivos globales: media 74,19, mediana 80, desviación estándar 13,9, mínimo 47,5 y máximo 95, lo que ubica la usabilidad percibida del sistema, en promedio, en un nivel *bueno*, con varios participantes calificando la experiencia como *excelente*. En la Figura 19 se muestra los resultados calculados.

**Figura 19**

*Puntuaciones SUS por participantes - Prototipo 1.*



### 6.3. Diseño del segundo prototipo

Con base a estos resultados el segundo prototipo se diseñó para integrar mejor el control con los actuadores de terapia, usando un ESP32 como parte principal. En esta versión se añadió un control inalámbrico por radiofrecuencia a 433 MHz para la minibike y la órtesis. Se mejoró el movimiento de la órtesis integrando el sensor MPU6050. Además, se consideró una

opción de activación con señales analógicas para cuando no se use el casco Emotiv EPOC, buscando que el sistema sea más práctico, estable y adaptable.

### **6.3.1. Integración del Emotiv EPOC con Cortex API**

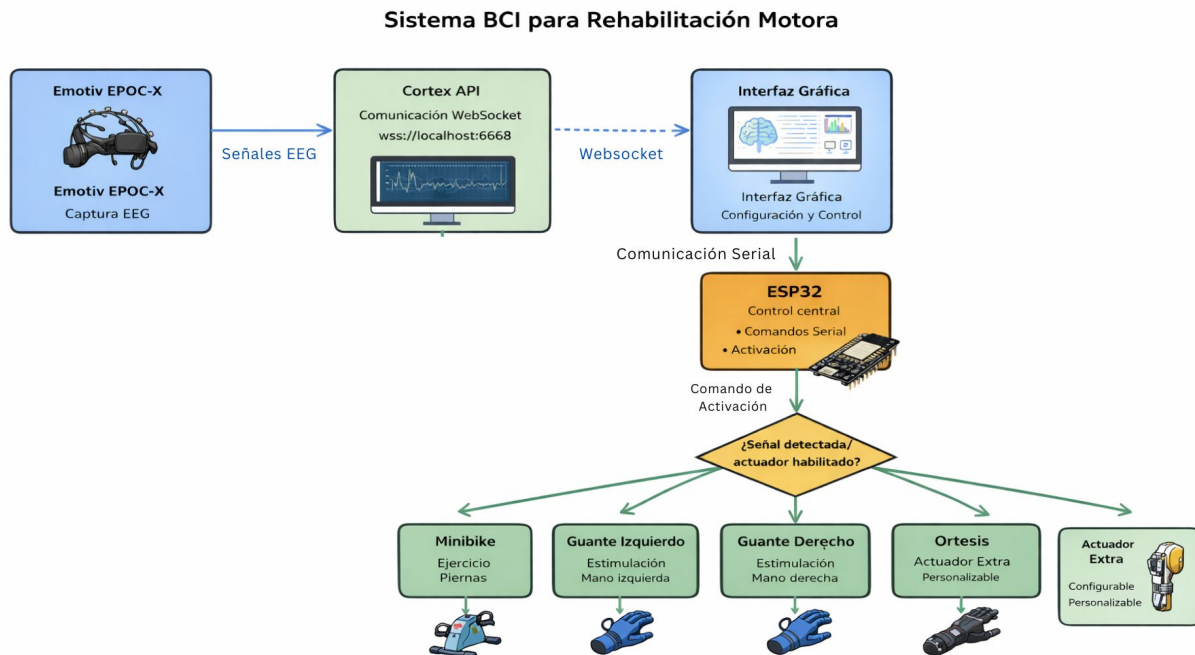
En la Figura 20 se presenta el diagrama del sistema BCI implementado. Se desarrolló una interfaz gráfica en Python para manejar todo el flujo del sistema BCI. Esta interfaz permite iniciar la conexión, seleccionar parámetros de sesión y supervisar la terapia mientras está en ejecución. La idea principal es que el usuario pueda trabajar con un entorno controlado, donde el programa reciba la actividad registrada por el Emotiv EPOC X y la transforme en acciones dentro del sistema de rehabilitación.

El Emotiv EPOC X capta las señales EEG y las envía al servicio de Emotiv que corre en el computador. Desde ahí, la Cortex API actúa como puente entre el casco y el software, ya que entrega los datos en tiempo real a través de una comunicación tipo WebSocket. En el código de Python, la aplicación se conecta a Cortex, realiza el proceso de autenticación, detecta el casco disponible, abre una sesión y se suscribe a los datos necesarios. Con esto, el programa empieza a recibir continuamente los paquetes de información y puede identificar el evento de activación definido para la terapia.

Cuando el sistema detecta la activación, la interfaz gráfica genera un comando de control y lo envía al módulo principal, que en este caso es el ESP32. La comunicación entre la computadora y el ESP32 se realiza por puerto serial, usando mensajes simples para que el microcontrolador ejecute la acción. Por ejemplo, se envía una señal de activación para disparar el ciclo de terapia y también se envían parámetros de configuración como modo de trabajo, actuadores seleccionados y tiempo de sesión. Finalmente, el ESP32 se encarga de convertir ese comando en una salida física, activando los dispositivos conectados, ya sea por control directo o por radiofrecuencia cuando corresponde.

**Figura 20**

*Sistema BCI para rehabilitación robótica.*



### 6.3.2. Guante robótico

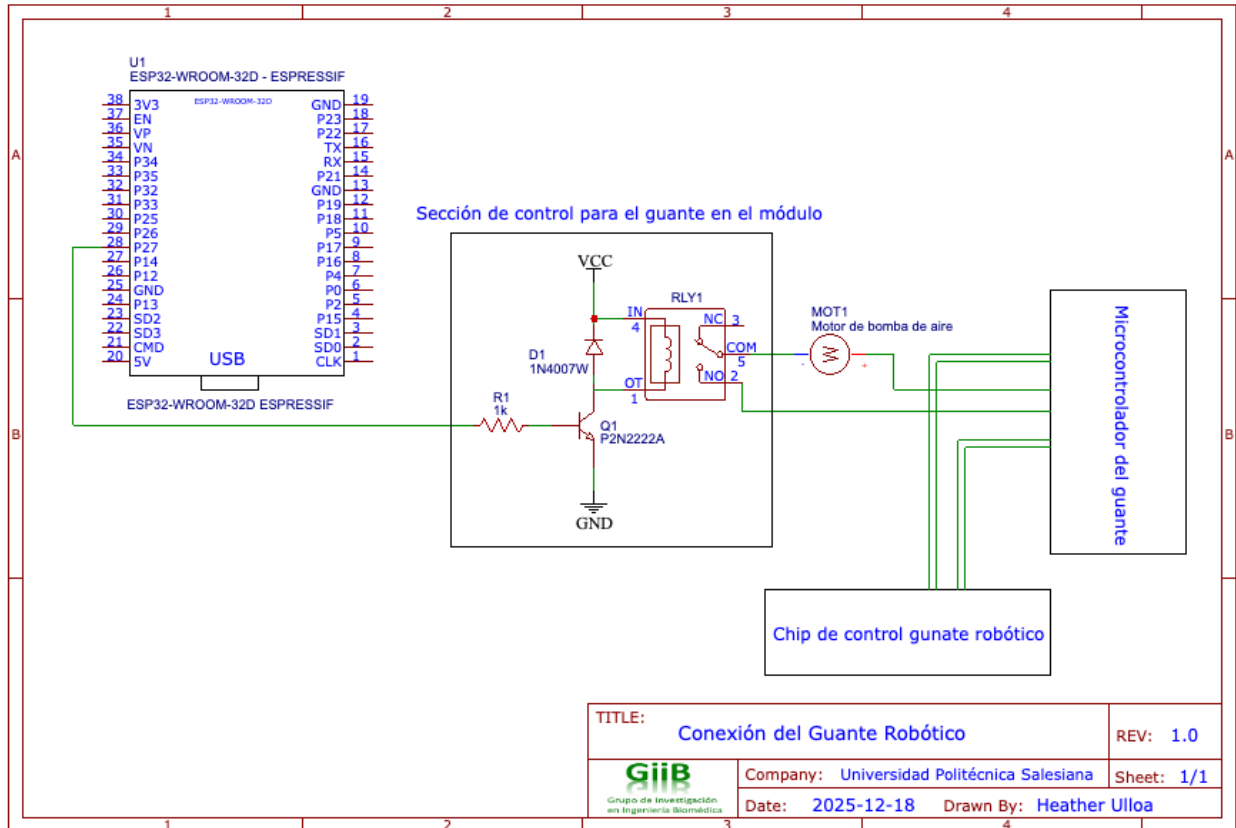
El guante robótico funciona con una bomba de aire que permite estirar los dedos cuando se activa y hace que regresen a su posición cuando se apaga.

Para integrarlo al sistema de rehabilitación, se añadió un control externo para habilitar o bloquear el uso del guante.

Este control se realiza mediante el ESP32; se incluyeron luces indicadoras que permiten identificar cuándo el guante se encuentra habilitado desde el módulo, logrando una integración ordenada y segura sin alterar el funcionamiento original del dispositivo. En la Figura 21 se muestra el diagrama del circuito para el control del guante.

**Figura 21**

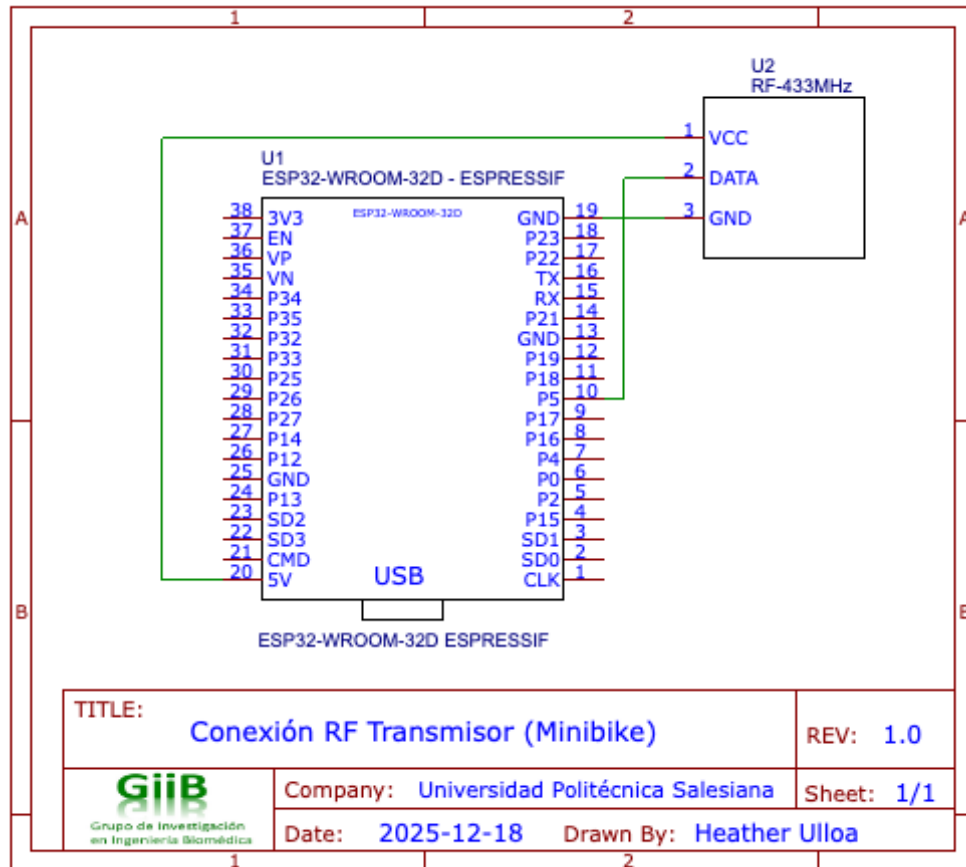
*Conexión del guante robótico.*



### 6.3.3. Minibike

Figura 22

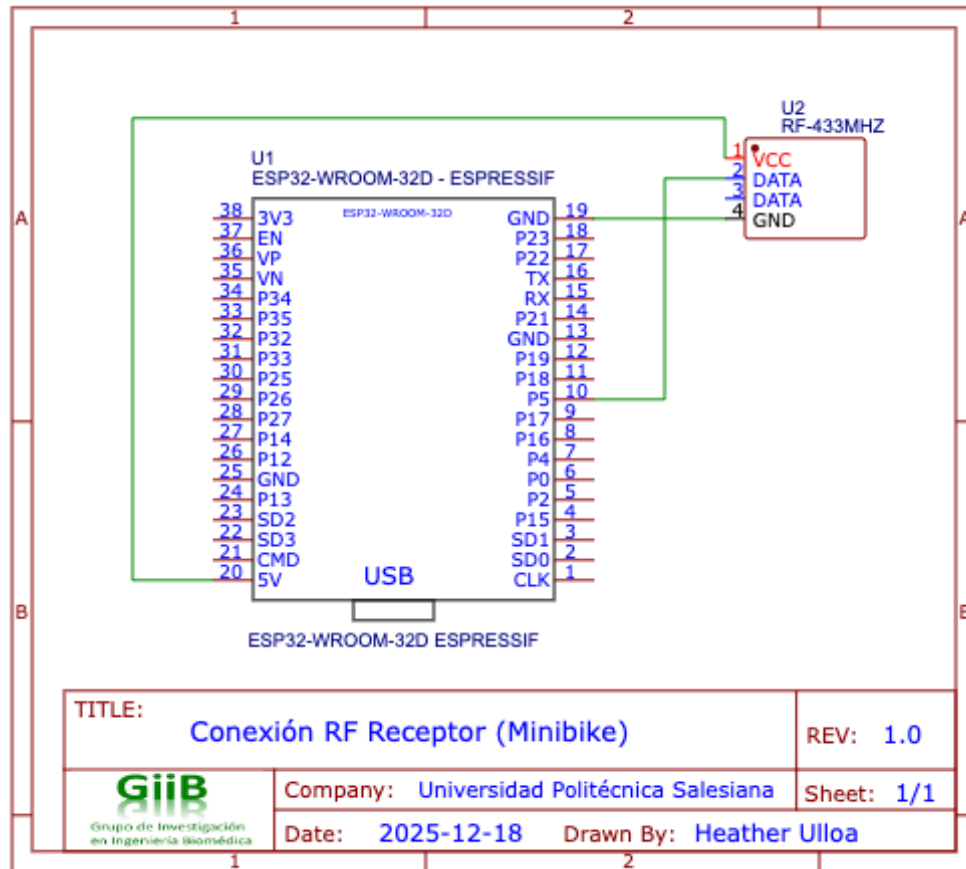
Conexión RF transmisor de minibike.



El control de la minibike se realiza a través de un sistema de radiofrecuencia (RF) que opera a 433 MHz, lo que permite una comunicación inalámbrica entre los dispositivos sin necesidad de cables. El sistema se compone de un transmisor y un receptor; los diagramas de transmisor y receptor se muestran en las Figuras 22 y 23.

**Figura 23**

*Conexión RF receptor de minibike.*



El transmisor está conectado al ESP32, que es el encargado de procesar las señales y enviar comandos. El receptor se encuentra en la minibike y recibe las señales enviadas desde el transmisor para activar el pedaleo. En la Figura 24 se muestra el diagrama de trabajo.

Cuando el ESP32 recibe la señal del Emotiv EPOC o cualquier otra fuente de activación, el transmisor envía la señal inalámbrica al receptor de la minibike para ponerla en funcionamiento. Este sistema de radiofrecuencia facilita que la minibike se active sin cables, proporcionando más libertad de movimiento durante la sesión de rehabilitación.

## Figura 24

*Integración RF con BCI.*

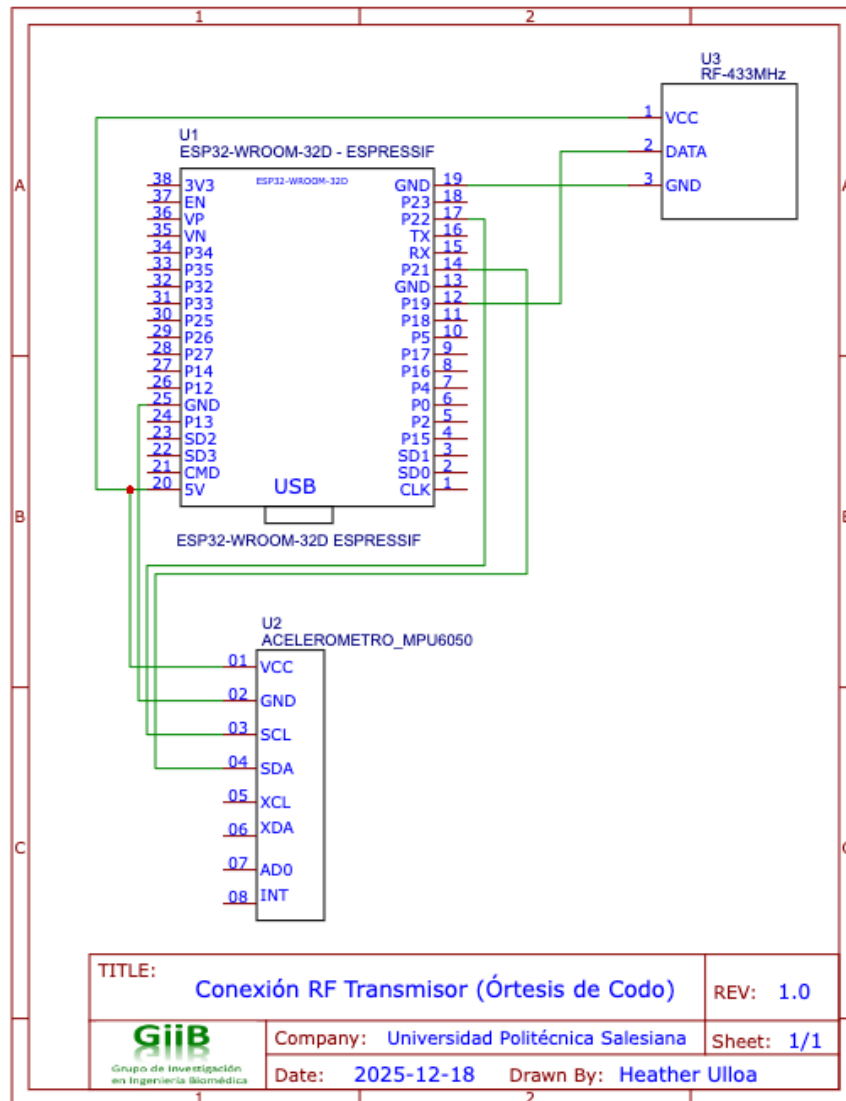
### Flujo de trabajo: Integración de RF con BCI



### 6.3.4. Órtesis de codo

Figura 25

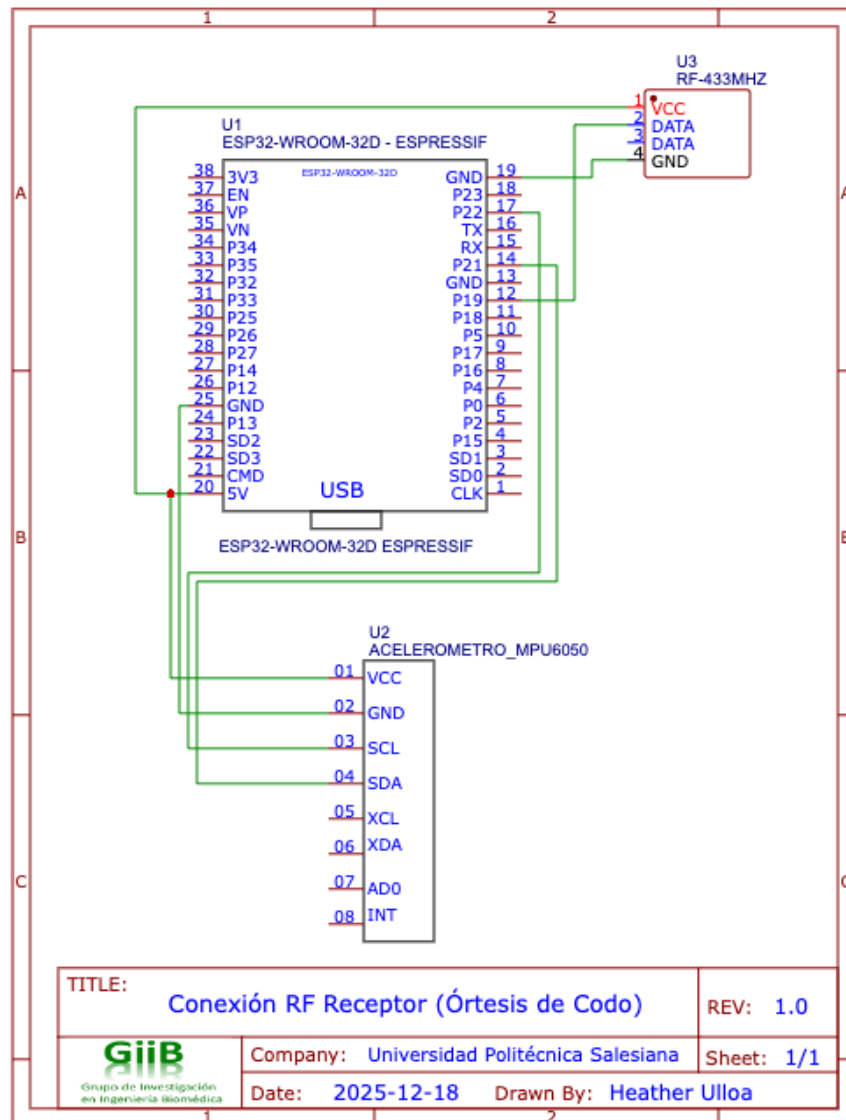
Conexión RF transmisor de órtesis de codo.



Esta órtesis, cuenta con un sistema de radiofrecuencia a 433 MHz al igual que la minibike, pero no hay interferencia porque cada dispositivo utiliza códigos diferentes para enviar y recibir señales. De este modo, el sistema puede controlar ambos dispositivos de forma independiente. Los diagramas de transmisor y receptor se muestra las figuras 25 y 26.

**Figura 26**

*Conexión RF receptor de órtesis de codo.*



Para el control de la órtesis, se integró un acelerómetro GY-521 MPU6050 de 6 ejes para detectar los movimientos de flexión y extensión del codo. El ESP32 recibe esta información y, con base en los datos proporcionados por el sensor, decide cuándo activar o ajustar la asistencia de la órtesis, ayudando al paciente a completar el movimiento si tiene dificultades.

### 6.3.5. Integración de actuadores con Emotiv EPOC

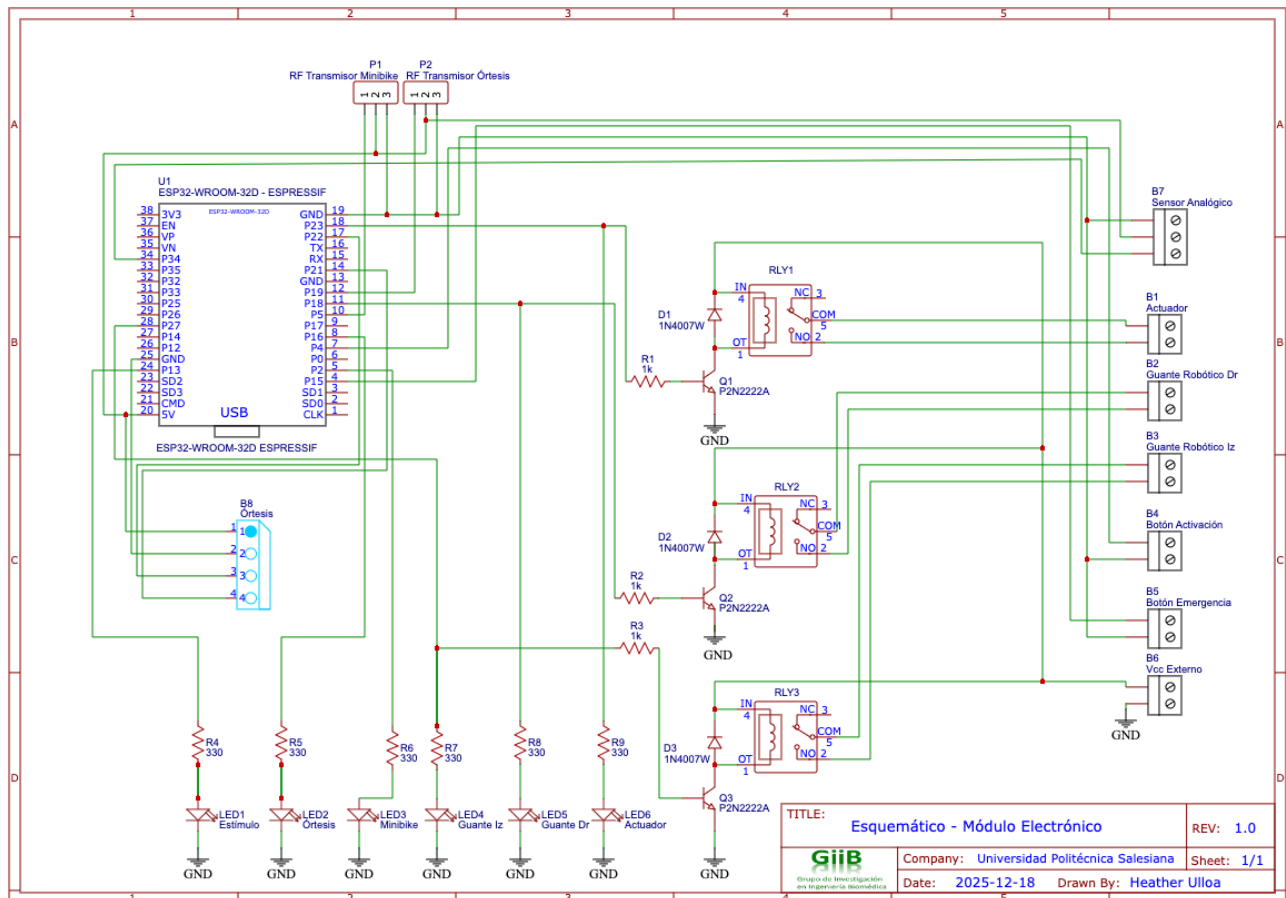
En el sistema BCI, el comando de activación que se utiliza es *Clench Teeth*. Cuando el software detecta ese gesto desde el Emotiv EPOC X por medio de Cortex API, la interfaz gráfica en Python interpreta esa detección como una activación válida y envía un comando corto al ESP32 por comunicación serial. Esto se maneja como un carácter 1, que al llegar por serial dispara la función de activación y ejecuta el ciclo de terapia según el modo configurado.

#### Esquemático electrónico

El ESP32 es el centro de control y desde ahí se manejan salidas de dos tipos: salidas por relé para cargas y salidas por radiofrecuencia para equipos inalámbricos. En la Figura 27 se presenta el esquemático del circuito del módulo.

Figura 27

Esquemático del módulo electrónico.



## Alimentación y referencia común

En el esquema se contempla una entrada de Vcc (5V) externo y GND, que sirve para alimentar la parte de potencia del módulo y tener una referencia común con el ESP32. Además, el ESP32 puede alimentarse por USB para la lógica de control.

Para calcular el consumo del sistema, se consideraron los bloques que se alimentan con Vcc de 5 V dentro del módulo de control, que son el ESP32, los transmisores RF 433 MHz, el sensor MPU6050, los relés y los LEDs indicadores. Este cálculo sirve para dimensionar la fuente y asegurar que el sistema trabaje estable cuando se activan varios canales a la vez. El consumo de los actuadores externos no se incluye aquí, ya que estos pueden tener su propia alimentación y el módulo solo los habilita mediante relés o radiofrecuencia. En la Tabla 4 se muestra los datos de consumo de corriente del circuito.

**Tabla 4**

*Estimación de consumo de corriente por bloque.*

| Bloque                | Cantidad | Corriente aproximada por unidad | Corriente total |
|-----------------------|----------|---------------------------------|-----------------|
| ESP32                 | 1        | 250 mA típico, 500 mA pico      | 250 a 500 mA    |
| Transmisor RF 433 MHz | 2        | 20 mA                           | 40 mA           |
| MPU6050               | 1        | 4 mA                            | 4 mA            |
| Relé 5 V              | 3        | 70 mA                           | 210 mA          |
| LEDs                  | 6        | 10 mA                           | 60 mA           |

### Consumo típico estimado:

$$I_{total} = 250 + 40 + 4 + 210 + 60 = 564 \text{ mA} \approx 0,56 \text{ A} \quad (1)$$

$$P_{total} = 5 \text{ V} ( 0,56 \text{ A} ) = 2,80 \text{ W} \quad (2)$$

Para trabajar con margen y evitar caídas de voltaje cuando se energizan relés y el ESP32 tiene picos de consumo, se recomienda una fuente mínima de 5 V y 1 A.

## **Etapas de potencia con relés, transistores y diodos**

Para controlar los actuadores, se usan tres relés. Cada relé es activado por un transistor 2N2222A, con una resistencia en la base de 1 k $\Omega$ , lo que permite que una salida del ESP32 controle la bobina del relé sin forzar al microcontrolador. Para proteger el circuito cuando el relé se apaga, cada bobina tiene un diodo 1N4007W en antiparalelo, que evita picos de voltaje.

Las salidas de los relés van a borneras o torneras identificadas como:

- B1: Actuador
- B2: Guante robótico derecho
- B3: Guante robótico izquierdo

## **Indicadores LED**

El módulo incluye LEDs con resistencias de 330  $\Omega$  para mostrar el estado de cada canal, por ejemplo, LED para estímulo, minibike, guante izquierdo, guante derecho, órtesis, actuador. Esto ayuda a verificar rápido si el ESP32 está activando correctamente cada salida.

## **Módulo de radiofrecuencia 433 MHz**

Para la minibike y la órtesis se usan dos transmisores RF conectados al ESP32, identificados como transmisor minibike y transmisor órtesis. En el firmware se usa la librería `RCSwitch` y se envían códigos distintos para cada equipo. Aunque ambos trabajan en 433 MHz, no se interfieren porque cada receptor responde solo a su código. Esto permite activar minibike y órtesis sin que uno active al otro por error.

## **Entradas adicionales y seguridad**

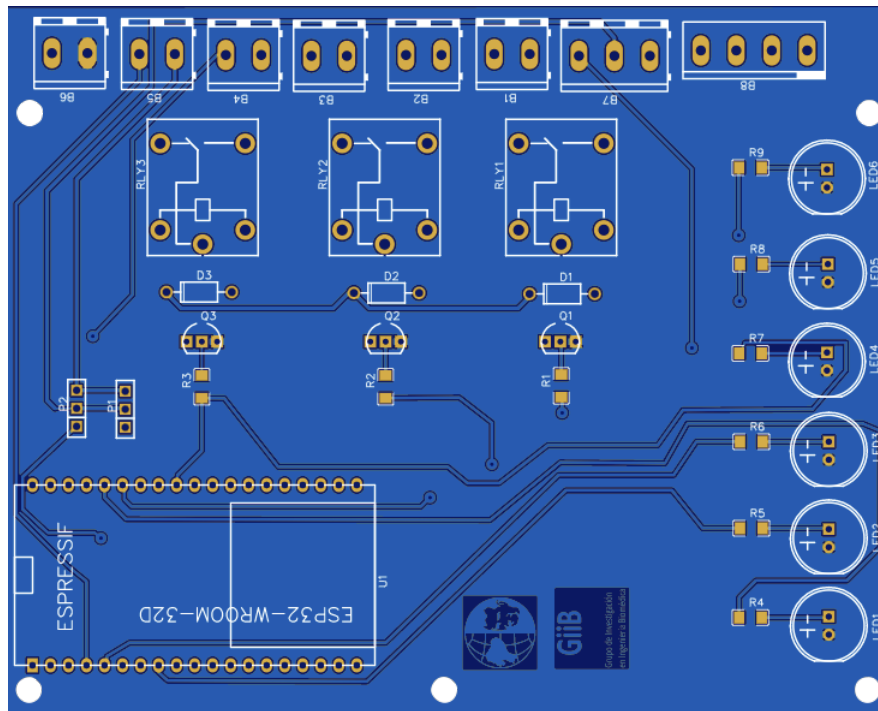
En el esquema también se incluyen borneras un para botón de activación y un botón de emergencia, que sirven como control manual y parada de seguridad. También aparece una entrada para un sensor analógico, como alternativa para activar el sistema cuando no se disponga del EPOC, de modo que el ESP32 pueda recibir una señal externa y ejecutar el mismo ciclo de activación.

### 6.3.6. Placa PCB

En la Figura 28 se presenta el diseño de la placa PCB.

**Figura 28**

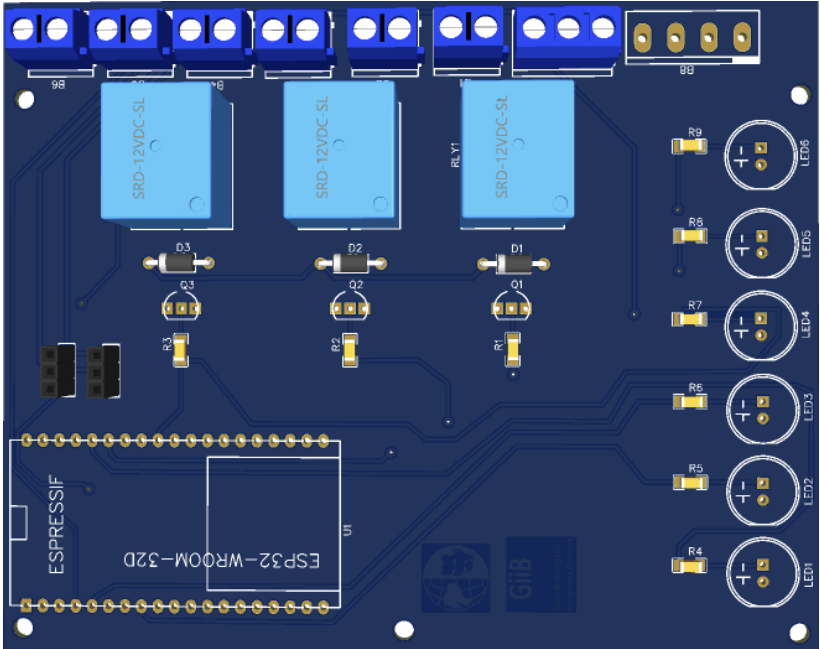
*Placa PCB en 2D.*



La idea principal de esta placa es que el cableado sea más ordenado, que las conexiones sean fáciles de identificar y que el control de los actuadores sea más estable durante la terapia. En la placa se incluyó el footprint para ESP32-WROOM-32D, ubicado en el lado izquierdo para dejar libre el espacio del ruteo y mantener una zona clara de control lógico. En la parte derecha se ubicaron los relés y las borneras, porque ahí están las conexiones que van hacia el exterior.

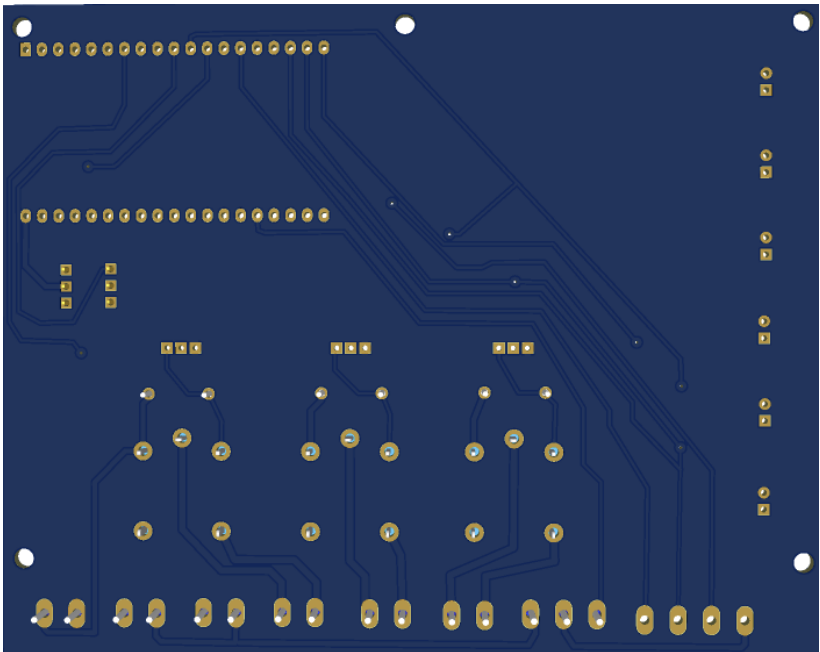
**Figura 29**

*Placa PCB en 3D vista superior.*



**Figura 30**

*Placa PCB en 3D vista inferior.*



Esta distribución ayuda a separar la parte de control y señales de la parte de potencia y salidas, lo cual facilita el montaje y reduce confusiones al momento de conectar los actuadores. También se colocaron LEDs en la parte inferior como indicadores visuales, para saber rápidamente qué canal está activo durante la sesión.

Los parámetros principales usados en el diseño se presenta en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Parámetros de diseño de la PCB.*

| <b>Parámetro</b>        | <b>Valor</b>    |
|-------------------------|-----------------|
| Ancho de pista          | 0,30 - 1,50 mm  |
| Separación entre pistas | 0,40 mm         |
| Diámetro de vía         | 1,15 mm         |
| Diámetro de taladro     | 1,10 mm         |
| Tamaño de placa         | 120 mm × 100 mm |

Se trabajó con un diseño de doble capa, lo que permitió rutear señales con más facilidad y mantener un trazado más limpio. Se priorizó que las rutas principales hacia relés y borneras sean directas, evitando cruces innecesarios y manteniendo trayectorias lo más cortas posible. También se consideró el uso de zonas amplias de cobre para referencia de tierra, ya que esto ayuda a estabilizar la electrónica y disminuir ruido en señales de control.

### **6.3.7. Diseño de la carcasa del módulo**

Para el segundo prototipo, se diseñó una carcasa con el fin de proteger la electrónica y facilitar su uso en las sesiones de terapia. Se fabricó con impresión 3D usando material PLA, que es ligero, accesible y adecuado para prototipos funcionales. El diseño se hizo en Fusion 360, ajustado a las dimensiones de la PCB y dejando espacio para conectores, borneras y cables.

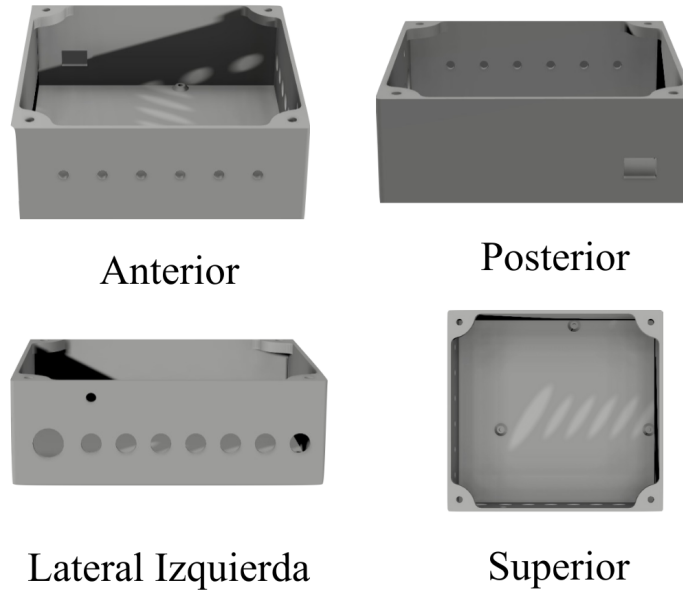
La carcasa tiene un tamaño de 156 mm de largo y 146 mm de ancho, con una altura de 57 mm. Se dejó un margen de 2 a 3 mm por lado para que la placa encaje sin quedar demasiado apretada. También se incluyeron soportes internos para fijar la PCB con tornillos y evitar que se mueva durante el uso.

En el diseño funcional, se añadieron aberturas para los conectores, el puerto USB-B del ESP32 y los módulos externos, como el transmisor RF o los sensores. Esto permite conectar y

desconectar sin abrir toda la carcasa. Además, se dejó espacio para que los LEDs indicadores sean visibles, para que el usuario pueda ver el estado del sistema durante la terapia. En la Figura 31 se presenta las vistas del modelo realizado.

### Figura 31

*Vistas principales de la carcasa.*



La carcasa también ayuda a aislar físicamente los componentes electrónicos, reduciendo el riesgo de contacto accidental con conexiones energizadas. Esto mejora la seguridad y protege contra cortocircuitos o daños por objetos metálicos cercanos.

#### 6.3.8. Interfaz gráfica

Se desarrolló una interfaz gráfica en Python que permite ingresar los datos del paciente, se elige el modo, los actuadores por ciclo y el tiempo de cada ciclo. También indica si el ESP32 está conectado, si la terapia está activa y cuántas activaciones se han realizado. En Modo 2, se ajusta el estímulo y se muestra el tiempo de reacción para luego analizarlo. En la figura 32 se muestra un extracto del código de la interfaz.

## Figura 32

*Código en Python de la interfaz gráfica de la terapia.*

```
1 import tkinter as tk
2 from tkinter import ttk, messagebox
3 from PIL import Image, ImageTk
4 import pandas as pd
5 from datetime import datetime
6 import serial
7 import serial.tools.list_ports
8 import threading
9 import time
10 import sys
11 import os
12 import json
13 import ssl
14 import re
15 from pathlib import Path
16 from websocket import create_connection
17
18 # =====
19 # GESTIÓN DE RECURSOS
20 # =====
21 def resource_path(relative_path):
22     """Obtiene el path absoluto, compatible con PyInstaller"""
23     try:
24         base_path = sys._MEIPASS
25     except Exception:
26         base_path = os.path.abspath(".")
27     return os.path.join(base_path, relative_path)
28
29 class TerapiaApp:
30     def __init__(self, root):
31         self.root = root
32         self.root.title("Control de Terapia Robótica - UPS GIIB (Final)")
33         self.root.geometry("1200x850")
34         self.root.configure(bg="#FFFFFF")
35
36         # --- Variables Serial ---
37         self.ser = None
38         self.serial_conectado = False
39
```

Las librerías utilizadas en Python fueron:

- `tkinter` y `ttk`: construcción de la interfaz gráfica.
- `threading`: ejecución simultánea de la interfaz, lectura serial y escucha de Cortex API.
- `pyserial`: comunicación Serial UART entre la computadora y el ESP32.
- `websocket-client`: comunicación con Cortex API mediante WebSocket.
- `ssl`: manejo de conexión segura.
- `json`: envío y recepción de mensajes en formato JSON (JSON-RPC).
- `time` y `datetime`: temporización, control de eventos y marcas de tiempo.
- `pandas`: almacenamiento y exportación de registros de sesión.

## Comunicación con el módulo (PC-ESP32)

La interfaz se comunica con el módulo de control mediante un cable USB usando comunicación Serial UART. La computadora cumple el rol de controlador principal, ya que recibe

los eventos provenientes de la Cortex API y envía las órdenes necesarias al microcontrolador para activar los actuadores.

El ESP32 permanece escuchando de forma constante el puerto serial. Cuando recibe un comando, responde con mensajes de confirmación que indican que la orden fue recibida y ejecutada correctamente. Gracias a esto, la interfaz puede mostrar el estado del sistema y detectar posibles fallas en la comunicación.

### **Protocolo de envío (PC → ESP32)**

El protocolo de envío se diseñó para ser simple y robusto. Se utilizan principalmente tres tipos de comandos:

1. **Mensaje de configuración:** se envía al inicio de cada ciclo para definir el modo, los actuadores habilitados y la duración del ciclo.

- Inicia con #
- Campos separados por punto y coma ;
- Termina con salto de línea

```
#modo;mb;g;gd;act;fut;ana;tMin;tiempoEstimuloS;
```

Donde:

- **modo:** 1 o 2
- **mb:** minibike (1=habilitado, 0=deshabilitado)
- **g:** guante izquierdo (1/0)
- **gd:** guante derecho (1/0)
- **act:** órtesis de codo (1/0)
- **fut:** salida adicional reservada (1/0)
- **ana:** habilita lectura de entrada analógica (1/0)
- **tMin:** duración total del ciclo en minutos
- **tiempoEstimuloS:** duración del estímulo en segundos (solo aplica en Modo 2)

2. **Mensaje de activación:** se envía cuando se detecta el evento de control para disparar la acción durante la terapia.
  - 1: ejecuta la activación según el modo configurado.
  - 0: se utiliza como liberación/fin de pulso desde la interfaz.
3. **Comando de parada:** se utiliza para finalizar la terapia y asegurar que los actuadores queden desactivados.
  - APAGAR: termina la terapia y apaga salidas.

### **Protocolo de recepción (ESP32 → PC)**

El ESP32 envía mensajes cortos para reportar estados y eventos. Los principales mensajes utilizados por la interfaz fueron:

- SISTEMA\_V13\_UNIVERSAL: indica que el sistema arrancó correctamente.
- MPU6050: CONECTADO o AVISO: MPU6050 NO ENCONTRADO: detección del sensor de ángulo.
- CONFIG\_OK: confirma que la configuración del ciclo fue recibida y aplicada.
- ACTIVACIONES:n: contador de activaciones acumuladas.
- ESTIMULO\_ACTIVADO: evento de estímulo activo en Modo 2..
- ANGULO:x: reporte de ángulo de la órtesis.
- TRABAJO\_FINALIZADO: indica el fin del intervalo de trabajo en Modo 2.
- TERAPIA\_COMPLETADA: se alcanza el tiempo total configurado.
- PARO\_EMERGENCIA\_ACTIVADO: se activó el paro.
- BTN: CLICK, SENSOR: ON/OFF: eventos provenientes de entradas físicas, útiles para trazabilidad.

Estos mensajes permiten a la interfaz actualizar indicadores en pantalla, controlar la transición entre ciclos y registrar información para análisis posteriores.

## Uso de Emotiv Cortex API (EEG)

Cortex API se emplea como puente entre el casco Emotiv EPOC y la aplicación desarrollada en Python. La comunicación se realiza mediante WebSocket utilizando mensajes JSON-RPC. La aplicación sigue los siguientes pasos:

- Solicitud de acceso (`requestAccess`) y autorización (`authorize`) para obtener un `cortexToken`.
- Consulta de headsets disponibles (`queryHeadsets`) y creación de sesión (`createSession`).
- Suscripción al *stream* de expresiones faciales (`subscribe`, `streams: ["fac"]`).

Una vez suscrito, el sistema monitorea la señal reportada por el stream `fac` y detecta el evento `clench` junto con su intensidad. Cuando la intensidad supera un umbral configurable desde la interfaz, se considera un evento válido y se envía el comando de activación al ESP32.

## Relación entre los códigos

Para la implementación completa del sistema se utilizaron tres piezas de software que trabajan de manera complementaria:

- **Firmware en ESP32 (Arduino IDE):** gestiona la recepción de comandos por Serial, el control de actuadores, el paro de emergencia y el control de ángulo mediante el MPU6050.
- **Interfaz de terapia (Python):** permite configurar ciclos, conectar el ESP32, conectarse a Cortex API, interpretar el evento *clench*, contabilizar activaciones y registrar los datos de la sesión.
- **Script de prueba Cortex API (Python):** se emplea para verificar de forma aislada la conexión y autorización con Cortex API, confirmando que el entorno y las credenciales permiten obtener el token antes de ejecutar la interfaz completa.

## 6.4. Pruebas de funcionalidad

### 6.4.1. Pruebas técnicas

Se realizaron pruebas técnicas para verificar que cada bloque del sistema responda bien, que la comunicación sea estable y que los actuadores se activen solo cuando corresponde.

También se buscó asegurar que no existan errores por conexiones, interferencia RF o fallos de activación durante el tiempo de terapia. Las pruebas fueron:

- **Activación y respuesta funcional:** Para verificar que los actuadores se activen solo cuando corresponde y que los comandos se ejecuten correctamente.
- **Estabilidad de comunicación inalámbrica:** Para comprobar que la señal por radiofrecuencia se mantenga estable a diferentes distancias.
- **Ensayo de estrés:** Para evaluar el comportamiento del sistema ante pulsaciones continuas o rápidas.
- **Verificación ante desconexiones repentinas:** Para revisar la reacción del sistema cuando se desconectan dispositivos durante el funcionamiento, evitando estados inseguros.
- **Evaluación de la carcasa:** Para comprobar que la carcasa proteja la electrónica y soporte manipulación y transporte sin deformarse o soltarse.

#### 6.4.2. Pruebas preliminares

Para llevar a cabo las pruebas con sujetos, se siguió un protocolo definido que permite verificar la funcionalidad del sistema. Este protocolo se detalla en el Anexo E.

#### **Protocolo de Evaluación Funcional Sistema de Rehabilitación Robótica Controlado por Emotiv EPOC**

**Objetivo de pruebas:** Evaluar la funcionalidad, estabilidad y sincronización del sistema de rehabilitación robótica controlado por Emotiv EPOC (guante robótico, minibike y órtesis de codo) en condiciones controladas, verificando que el sistema responda correctamente a la intención del usuario (Modo 1) y a un estímulo visual (Modo 2), y que los datos se registren adecuadamente.

**Alcance de pruebas:** Este protocolo se aplica a pruebas en voluntarios sanos, en un entorno controlado (laboratorio), con fines de validación funcional del prototipo.

#### **Descripción del sistema**

- Dispositivos/actuadores:
  - a) Guante robótico (mano).

- b) Minibike de pedaleo.
- c) Órtesis de codo.
- Captura de señal: Headset Emotiv EPOC.
- Software: Emotiv Launcher + Cortex API y la interfaz del sistema de rutina.
- Modos de trabajo:
  - a) **Modo 1:** Activación voluntaria por intención del usuario.
  - b) **Modo 2:** Activación guiada por estímulo visual (LED).

### **Participantes**

- Población: Voluntarios adultos sanos
- Criterios de inclusión:
  - a) Sin antecedentes de trastornos neurológicos.
  - b) Sin contraindicaciones para actividad física ligera.
  - c) Acepta participar mediante consentimiento informado.
- Criterios de exclusión:
  - a) Molestias o dolor durante la prueba.
  - b) Falla persistente de contacto de electrodos (<80%) que impida el registro.

### **Materiales y recursos**

- Headset Emotiv EPOC con electrodos y solución salina.
- Computadora con:
  - a) Emotiv Launcher instalado y acceso a Cortex API.
  - b) Interfaz del sistema de terapia.
- Módulo de control del sistema.
- Elementos del sistema (guante, minibike, órtesis de codo).
- Estímulo visual (LED) para Modo 2.

- Formatos:
  - a) Consentimiento informado
  - b) Cuestionario SUS post-sesión.

### **Condiciones del entorno**

- Área segura, con silla estable para el participante.
- Supervisión del investigador y acceso a un “botón de parada”/opción de detener la rutina desde el software.
- Sin distracciones excesivas (ruido, interrupciones) durante la medición.

### **Procedimiento**

Duración de la sesión de evaluación: 15 minutos (aprox.).

La ejecución de rutinas se divide en Modo 1 (3 min) + Modo 2 (3 min).

#### **PASO 1. Preparar el dispositivo Emotiv EPOC**

- Remojar los electrodos por 10 minutos en solución salina.
- Colocar los electrodos en el casco Emotiv EPOC.
- Colocar el casco Emotiv EPOC en el participante.

#### **PASO 2. Configurar Emotiv Launcher y Cortex API**

- Verificar la calidad de contacto de los electrodos y lograr una efectividad  $\geq 80\%$ .
- Conectar la computadora con el módulo de control del sistema.
- Iniciar Emotiv Launcher y conectar el servicio Cortex API.

#### **PASO 3. Abrir el programa de la interfaz de rutina**

- Ejecutar la interfaz del sistema de terapia.
- Ingresar datos del participante (ej.: nombre, edad, peso, etc.).
- Seleccionar el puerto de comunicación del módulo (ej.: COM asignado; si aplica, COM10).

- Configurar el comando/acción de activación (“*clench teeth*”) y ajustar el threshold según el participante.

#### **PASO 4. Seleccionar el Modo de Trabajo 1 (activación voluntaria)**

Confirmar que el usuario puede activar/desactivar los actuadores voluntariamente desde la detección definida.

#### **PASO 5. Crear y ejecutar la rutina (Modo 1)**

Ejecutar 3 sesiones de 60 segundos cada una (total 3 minutos):

- Sesión 1: Solo guante robótico.
- Sesión 2: Solo minibike.
- Sesión 3: Solo órtesis de codo.

Registrar observaciones técnicas: respuesta del sistema, estabilidad, cualquier retraso o fallo.

#### **PASO 6. Seleccionar el Modo de Trabajo 2 (estímulo visual)**

Activación guiada por estímulo visual (LED). El LED se enciende cada 10 segundos como señal de activación.

#### **PASO 7. Crear y ejecutar la rutina (Modo 2)**

Ejecutar 3 sesiones de 60 segundos cada una (total 3 minutos), con estímulo LED cada 10 segundos:

- Sesión 1: Solo guante robótico.
- Sesión 2: Solo minibike.
- Sesión 3: Solo órtesis de codo.

#### **PASO 8. Finalizar y guardar los datos**

- Guardar los datos de cada modo en archivos .xlsx.
- Verificar que el archivo contenga la información mínima (fecha/hora, modo, sesión, eventos de activación, etc.).

## Criterios de evaluación funcional

| Criterio                                            | Descripción                                                                  |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Reconocimiento de intención / respuesta al estímulo | Tasa de activación correcta (%) por modo y por actuador.                     |
| Tiempo de reacción                                  | Tiempo desde la orden/estímulo hasta la activación (ms o s).                 |
| Sincronización                                      | Activación coordinada cuando se seleccionan los tres actuadores.             |
| Movimiento completado                               | Confirmación visual/funcional de que el actuador ejecutó la acción prevista. |
| Percepción del usuario                              | Puntaje SUS post-sesión.                                                     |

## Criterios de éxito y fallo

- **Éxito funcional:** Activación correcta  $\geq 80\%$  y sin fallas críticas durante la mayoría de las sesiones.
- **Fallo técnico:** No activación repetida, desincronización marcada o tasa de error  $\geq 20\%$  en más de 2 sesiones por modo. Registro de datos incompleto o pérdida de archivos.

## Documentos adjuntos:

- Consentimiento informado.
- Cuestionario SUS.

## 7. Resultados y discusión

### 7.1. Módulo electrónico

El módulo electrónico de la Figura 33 presenta un diseño exterior funcional con LEDs para cada actuador, lo que facilita la visualización de su estado. Los conectores laterales permiten una fácil conexión, mientras que la carcasa robusta y bien acabada asegura protección de los componentes internos.

**Figura 33**

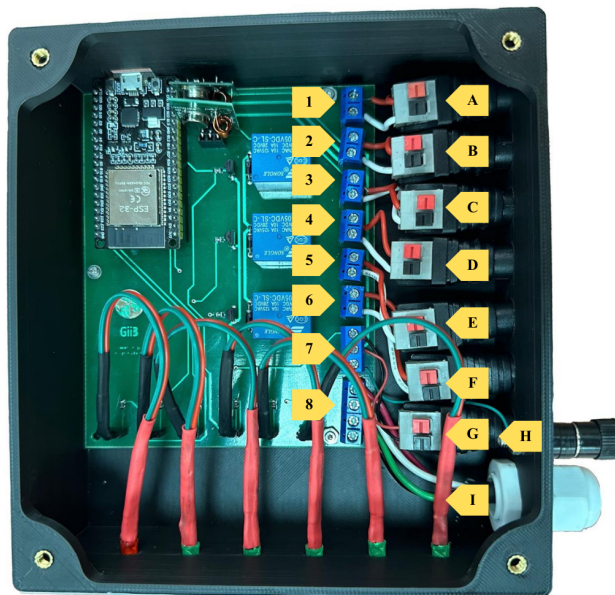
*Módulo electrónico.*



En la Figura 34 se muestran las bornas azules numeradas del 1 al 8, que corresponden a las salidas de la placa conectadas a borneras de conector DC 3,5 x 2,5 mm (etiquetadas de la A a la I), los actuadores del sistema.

**Figura 34**

*Etiquetas de las borneras.*



Las conexiones se detallan en la Figura 34 y en las Tablas 6 y 7.

**Tabla 6**

*Bornenas azules numeradas del 1 al 8 y su función.*

| <b>Bornera</b> | <b>Función o conexión.</b>                                               |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1              | Línea de alimentación.                                                   |
| 2              | Conexión hacia el botón de emergencia.                                   |
| 3              | Conexión para el botón de activación del sistema.                        |
| 4              | Salida hacia el guante izquierdo para activación durante la terapia.     |
| 5              | Salida hacia el guante derecho para activación durante la terapia.       |
| 6              | Salida hacia el actuador extra para activación durante la terapia.       |
| 7              | Salida para el sensor analógico encaso de no disponer del Emotiv EPOC X. |
| 8              | Salida hacia el órtesis de codo para activación durante la terapia.      |

**Tabla 7**

*Conectores tipo DC (etiquetados de A a I) y su función.*

| <b>Conector</b> | <b>Función o dispositivo conectado</b>            |
|-----------------|---------------------------------------------------|
| A               | Entrada de la fuente de alimentación del sistema. |
| B               | Entrada desde el botón de emergencia.             |
| C               | Entrada desde el botón de activación manual.      |
| D               | Entrada de señal del guante izquierdo.            |
| E               | Entrada de señal del guante derecho.              |
| F               | Entrada de señal del actuador extra.              |
| G               | Voltaje de entrada para la señal analógica        |
| H               | Entrada de señal analógica.                       |
| I               | Entrada de señal del órtesis de codo.             |

La figura 35 muestra las distintas vistas del módulo, donde la cara A (vista frontal) presenta los indicadores LED que muestran el estado de cada actuador. La cara B (vista lateral) detalla las conexiones de entrada, como los puertos de alimentación y las conexiones para los dispositivos externos. Por último, la cara C (vista posterior) ilustra las entrada para conectar el microcontrolador.

**Figura 35**

*Cara A, B y C del módulo electrónico.*



El consumo de energía total del sistema se calcula sumando el consumo de cada uno de los componentes del circuito, que están activos durante una sesión de terapia de 20 minutos. A continuación, se detallan los componentes involucrados:

- **ESP32:** El ESP32 tiene un consumo promedio de 160 mA cuando está en funcionamiento normal. Su voltaje de operación es de 5V.
- **3 Transistores:** Cada transistor tiene una corriente de base de 1 mA, con un voltaje de operación de 5V.
- **3 Diodos:** Cada diodo consume aproximadamente 0,5 mA con un voltaje de 0,7V.
- **2 Antenas de RF:** Cada antena consume aproximadamente 50 mA con un voltaje de operación de 3,3V.
- **6 LEDs:** Cada LED consume 20 mA con un voltaje de operación de 3,3V. Los LEDs tienen una resistencia de 330  $\Omega$  para limitar la corriente.
- **Resistencias (1k  $\Omega$  para transistores y 330  $\Omega$  para LEDs):** Las resistencias no consumen energía por sí mismas, pero limitan la corriente en el circuito.
- **MPU6050 (Acelerómetro):** Este sensor consume aproximadamente 3,9 mA a 5V.

Para calcular el consumo total, se utiliza la siguiente fórmula:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{ESP32}} + \sum_{i=1}^3 P_{\text{transistor}} + \sum_{j=1}^3 P_{\text{diodo}} + \sum_{k=1}^2 P_{\text{RF}} + \sum_{l=1}^6 P_{\text{LED}} + P_{\text{MPU6050}} \quad (3)$$

Donde:

$$P = V \times I \quad (4)$$

y los cálculos para cada componente son:

$$P_{\text{ESP32}} = 5V \times 0,160A = 0,800W$$

$$P_{\text{transistor}} = 5V \times 0,001A = 0,005W$$

$$P_{\text{diodo}} = 0,7V \times 0,0005A = 0,00035W$$

$$P_{\text{RF}} = 3,3V \times 0,050A = 0,165W$$

$$P_{\text{LED}} = 3,3V \times 0,020A = 0,066W$$

$$P_{\text{MPU6050}} = 5V \times 0,0039A = 0,0195W$$

Calculando la potencia total:

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} &= 0,800 + (3 \times 0,005) + (3 \times 0,00035) + (2 \times 0,165) + (6 \times 0,066) + 0,0195 \\ &= 0,800 + 0,015 + 0,00105 + 0,330 + 0,396 + 0,0195 = 1,56155W \end{aligned}$$

Para obtener el consumo durante una sesión de 20 minutos:

$$E_{\text{total}} = P_{\text{total}} \times \text{tiempo} \quad (5)$$

Donde el tiempo es de 20 minutos ( $20 \text{ min} = \frac{20}{60} h = \frac{1}{3} h$ ):

$$E_{\text{total}} = 1,56155W \times \frac{1}{3} h = 0,52052Wh$$

Por lo tanto, el consumo de energía estimado durante una terapia de 20 minutos es de aproximadamente  $0,52Wh$ .

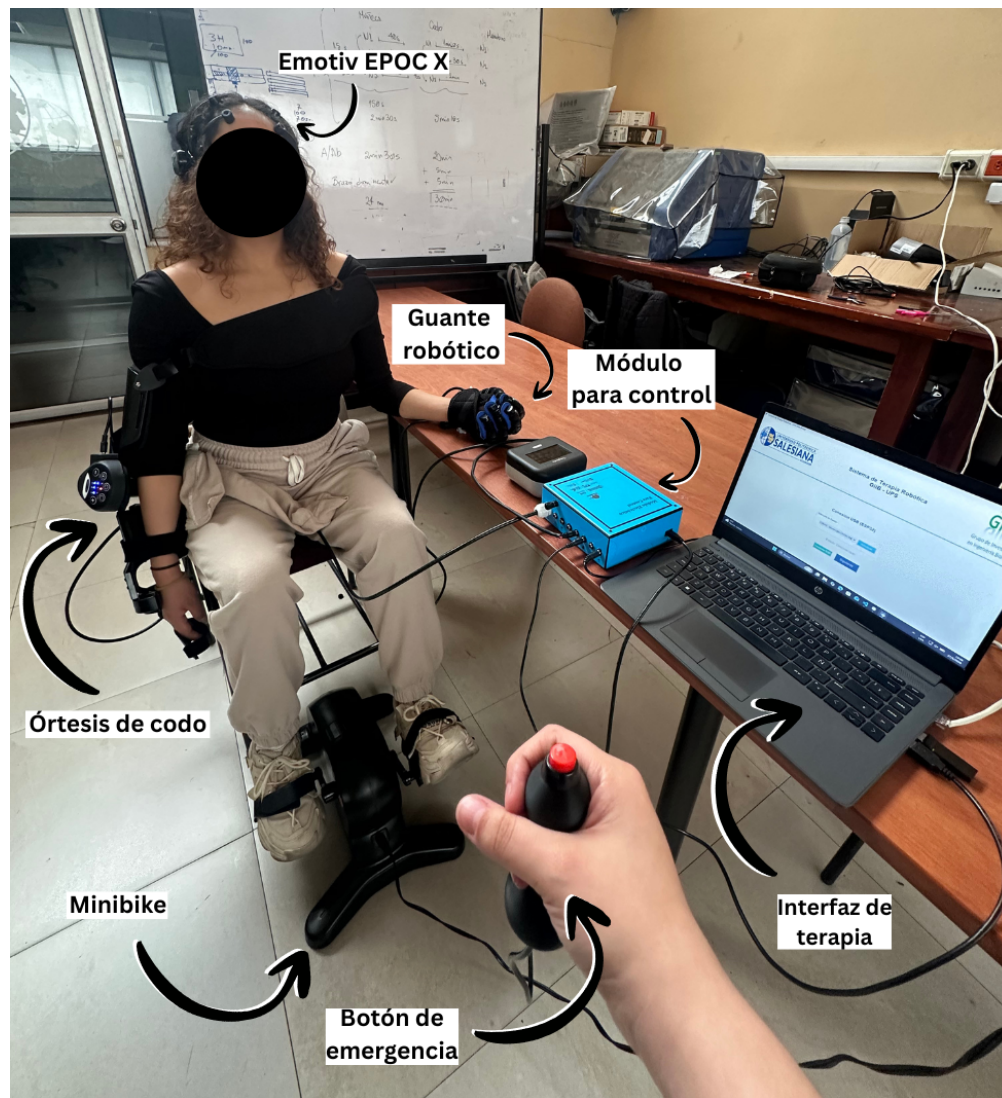
### 7.1.1. Sistema completo

Una vez finalizado el rediseño del módulo electrónico, este se integra al sistema completo de rehabilitación. El sistema está conformado por los siguientes componentes principales:

- **Emotiv EPOC:** Dispositivo encargado de captar las señales EEG del usuario, a partir de las cuales se obtiene la intención o comando de control durante la terapia.
- **Módulo electrónico:** Unidad central que recibe los comandos del software y gestiona la activación de los actuadores mediante relés, indicadores LED y comunicaciones inalámbricas cuando aplica.
- **Órtesis de codo:** Dispositivo de asistencia para el movimiento del codo que incorpora un acelerómetro.
- **Guante robótico:** Dispositivo orientado a la rehabilitación de la mano, ejecutando patrones de apertura y cierre.
- **Minibike:** Dispositivo destinado a ejercicios cíclicos de miembros inferiores, activado de forma controlada durante la sesión.
- **Botón de activación manual:** Pulsante utilizado para activar el sistema.
- **Botón de emergencia:** Mecanismo de seguridad que interrumpe la terapia de forma inmediata ante cualquier situación no deseada.

**Figura 36**

*Sistema Completo.*



## 7.2. Interfaz de terapia

Se presenta los resultados de la interfaz de terapia desarrollado para el sistema de rehabilitación. El interfaz contiene 6 ventanas principales que guían al experto desde la conexión del sistema hasta la ejecución de la terapia.

### 7.2.1. Configuración de conexión

En esta pantalla se realiza la configuración de conexión entre la computadora y el módulo de control. El objetivo es asegurar que el sistema reconozca correctamente al ESP32 antes de iniciar cualquier rutina. Una vez establecida la comunicación, la interfaz confirma el estado de conexión y habilita las opciones de control para evitar errores durante la terapia.

**Figura 37**

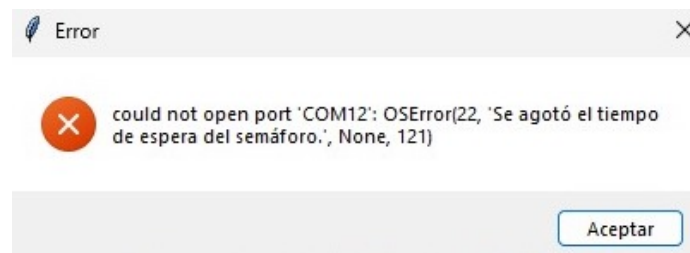
*Pantalla de configuración de conexión.*



Si por alguna razón se selecciona el puerto incorrecto o no se logra la comunicación con el módulo, la interfaz mostrará un mensaje de error.

**Figura 38**

*Mensaje de error de conexión.*



**Figura 39**

*Pantalla con error de conexión.*



Si la conexión es exitosa, se despliega un mensaje de confirmación y se puede ingresar a la siguiente ventana.

**Figura 40**

*Mensaje de conexión exitosa.*



**Figura 41**

*Pantalla de conexión exitosa.*



### 7.2.2. Registro de datos del paciente

En la pantalla de “Registro de datos del paciente” se ingresan los datos básicos antes de iniciar la terapia, como nombre, edad, peso, estatura y sexo. Esta información permite identificar la sesión y asociar correctamente los resultados generados por el sistema al paciente correspondiente.

#### Figura 42

*Pantalla datos de paciente.*



Sistema de Terapia Robótica  
GIIB - UPS



**Datos del Paciente**

Nombre

Edad

Peso (kg)

Estatura (cm)

Sexo

### 7.2.3. Selección de modo de trabajo

En la pantalla de “Selección de modo de rehabilitación” el usuario define cómo se activarán los actuadores durante la rutina. Se presentan dos opciones:

- Modo 1 (Activación propia), donde el paciente activa los actuadores por voluntad propia como parte del ejercicio.
- Modo 2 (Activación por estimulación), en el que la activación se realiza mediante una estimulación controlada por el sistema. En este modo, se configura el tiempo de estímulo (s) para ajustar la duración de cada activación antes de continuar con la terapia.

**Figura 43**

*Pantalla selección de modo de rehabilitación.*



#### 7.2.4. Configuración Emotiv–Cortex

En la pantalla de “Configuración Emotiv Cortex” se establece la comunicación entre la interfaz gráfica y el headset Emotiv EPOC mediante la plataforma Cortex API. Aquí se visualiza el estado de conexión y se dispone del botón Conectar Headset para enlazar el dispositivo antes de iniciar la terapia. Además, se incluye un control de sensibilidad *Clench*, que permite ajustar el umbral de detección de la expresión facial utilizada como comando, con el fin de mejorar la respuesta del sistema y reducir activaciones no deseadas.

**Figura 44**

*Pantalla configuración Emotiv - Cortex.*



Sistema de Terapia Robótica  
GIIB - UPS



**Configuración Emotiv Cortex**

Estado: Desconectado

Conectar Headset

Sensibilidad Clench:

0.55

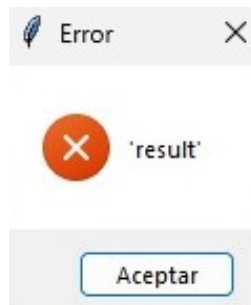
Atrás

Siguiente

Cuando hay un fallo en la conexión se despliega un mensaje de error.

**Figura 45**

*Mensaje de error con el Cortex.*



**Figura 46**

*Pantalla de error con el Cortex.*

## Configuración Emotiv Cortex

Estado: Desconectado

Conectar Headset

Sensibilidad Clench:

0.55

Atrás

Siguiente

Cuando se empareja exitosamente el interfaz con el Emotiv EPOC se muestra un mensaje de “conectado” en la pantalla.

**Figura 47**

*Pantalla exitosa con el Cortex.*



Sistema de Terapia Robótica  
GIIB - UPS

**GIIB**  
Grupo de Investigación  
en Ingeniería Biomédica

## Configuración Emotiv Cortex

Conectado

Conectar Headset

Sensibilidad Clench:

0.55

Atrás

Siguiente

### 7.2.5. Configuración de terapia

En la pantalla de “Configuración de Terapia” se define la rutina que ejecutará el sistema antes de iniciar la sesión. Aquí se selecciona el número de ciclos y, para cada ciclo, se eligen los actuadores. Además se puede ajustar el parámetro de tiempo mínimo de activación. Finalmente, al presionar “Iniciar Terapia”, la interfaz envía la configuración al módulo de control para ejecutar la secuencia programada.

**Figura 48**

*Pantalla de configuración de terapia.*

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

Sistema de Terapia Robótica GIIB - UPS

GIIB Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica

---

**Configuración de Terapia**

Número de Ciclos: 3

Ciclo 1

Minibike  Guante Izquierdo  Guante Derecho  Órtesis de codo  Actuador  Señal Analógica Min: 5

Ciclo 2

Minibike  Guante Izquierdo  Guante Derecho  Órtesis de codo  Actuador  Señal Analógica Min: 5

Ciclo 3

Minibike  Guante Izquierdo  Guante Derecho  Órtesis de codo  Actuador  Señal Analógica Min: 5

Atrás INICIAR TERAPIA

### 7.2.6. Ejecución de terapia

En la pantalla de “Ejecución de terapia” se visualiza el ciclo en curso, los actuadores seleccionados y el temporizador del ciclo. Para el Modo 1, el sistema ejecuta la rutina según la activación del usuario, mostrando el estado del ciclo y el conteo de activaciones realizadas. En el Modo 2, además se indica que el sistema se encuentra esperando el impulso de estimulación (LED encendido), registrando igualmente las activaciones durante la terapia. En ambos casos se incluye el botón Finalizar / Emergencia para detener la sesión de forma inmediata.

**Figura 49**

*Pantalla en ejecución de la terapia - modo 1.*



**Figura 50**

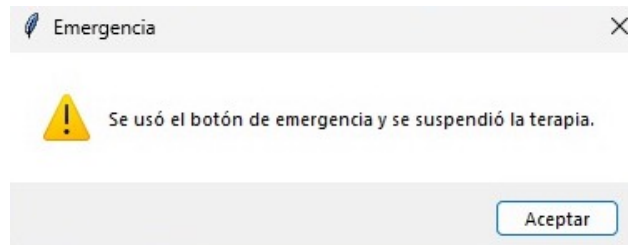
*Pantalla en ejecución de la terapia - modo 2.*



En caso de tener que parar la terapia inmediatamente, se usará el botón de emergencia.

### Figura 51

*Mensaje de uso de botón de emergencia.*

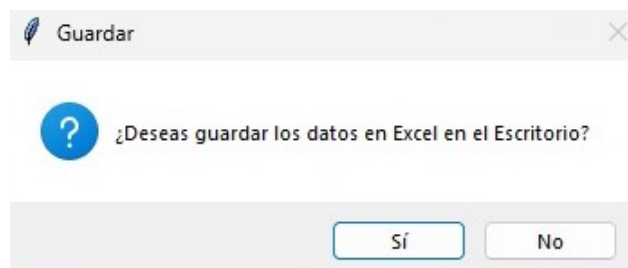


### 7.2.7. Datos en Excel de paciente

Finalmente, la interfaz permite guardar o exportar la información de la sesión en un archivo Excel.

### Figura 52

*Mensaje datos guardados.*



### Figura 53

*Mensaje datos guardados exitosamente.*



En este archivo se registran los datos del paciente y los parámetros básicos de la terapia aplicada, lo que facilita llevar un historial.

Figura 54

Pantalla resumen - modo 1.

| Paciente                                            | FechaHora           | Ciclo | Duration_min | Actuaciones                                  | Modo_Rehabilitacion | Total_Activaciones | Tempo_Reaccion_Promedio_ms | Tempo_Reaccion_Min_ms | Tempo_Reaccion_Max_ms | Total_Respuestas | Tempo_Estimulo |
|-----------------------------------------------------|---------------------|-------|--------------|----------------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| Sujeto 1   23 años   58.0 kg   157.48 cm   Femenino | 2026-01-22 18:46:17 | 1     | 1            | Guante izquierdo                             | Modo 1              | 22                 |                            |                       |                       |                  |                |
| Sujeto 1   23 años   58.0 kg   157.48 cm   Femenino | 2026-01-22 18:46:17 | 2     | 1            | Minibike                                     | Modo 1              | 17                 |                            |                       |                       |                  |                |
| Sujeto 1   23 años   58.0 kg   157.48 cm   Femenino | 2026-01-22 18:46:17 | 3     | 1.01         | Ortesis de codo                              | Modo 1              | 56                 |                            |                       |                       |                  |                |
| Sujeto 1   23 años   58.0 kg   157.48 cm   Femenino | 2026-01-22 18:46:17 | 4     | 1            | Guante izquierdo, Minibike y Ortesis de codo | Modo 1              | 11                 |                            |                       |                       |                  |                |

Figura 55

Pantalla resumen - modo 2.

| Paciente                                     | FechaHora           | Ciclo | Duration_min | Actuaciones                                  | Modo_Rehabilitacion | Total_Activaciones | Tempo_Reaccion_Promedio_ms | Tempo_Reaccion_Min_ms | Tempo_Reaccion_Max_ms | Total_Respuestas | Tempo_Estimulo |
|----------------------------------------------|---------------------|-------|--------------|----------------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| 1   23 años   58.0 kg   157.48 cm   Femenino | 2026-01-22 18:54:05 | 1     | 1            | Guante izquierdo                             | Modo 2              | 5                  | 2736.2                     | 1348                  | 3620                  | 5                | 10             |
| 1   23 años   58.0 kg   157.48 cm   Femenino | 2026-01-22 18:54:05 | 2     | 1            | Minibike                                     | Modo 2              | 5                  | 3046.4                     | 2420                  | 3845                  | 5                | 10             |
| 1   23 años   58.0 kg   157.48 cm   Femenino | 2026-01-22 18:54:05 | 3     | 1            | Ortesis de codo                              | Modo 2              | 5                  | 3277                       | 639                   | 3787                  | 5                | 10             |
| 1   23 años   58.0 kg   157.48 cm   Femenino | 2026-01-22 18:54:05 | 4     | 1            | Guante izquierdo, Minibike y Ortesis de codo | Modo 2              | 5                  | 2014.2                     | 1473                  | 3143                  | 5                | 10             |

### 7.3. Pruebas

A continuación, se mostrará los resultados tanto de las pruebas técnicas como las pruebas en sujetos.

#### 7.3.1. Resultados de las pruebas técnicas

Los resultados de las pruebas técnicas fueron los siguientes:

##### **Activación y respuesta funcional**

Las pruebas de activación funcional del sistema se realizaron utilizando el pulsante de activación para verificar que los actuadores (guante izquierdo, minibike y órtesis de codo) funcionaran adecuadamente.

**Tabla 8**

*Resumen de respuestas de pruebas de activación funcional - Modo 1.*

| Actuador          | Duración (min) | Ciclo | Modo | Total de Activaciones |
|-------------------|----------------|-------|------|-----------------------|
| Guante Izquierdo  | 1              | 1     | 1    | 22                    |
| Minibike          | 1              | 2     | 1    | 17                    |
| Órtesis de Codo   | 1              | 3     | 1    | 16                    |
| 3 Simultáneamente | 1              | 4     | 1    | 11                    |

En la Tabla 8 se muestran los resultados del Modo 1, donde se evaluaron los actuadores en ciclos de 1 minuto. Durante estas pruebas, el guante minibike se encendió primero, seguido del guante y la órtesis de codo, que se encendieron simultáneamente. Al apagarse, el guante y la órtesis se apagaron primero, luego el minibike.

**Tabla 9**

*Resumen de respuestas de pruebas de activación funcional - Modo 2.*

| Actuador          | Duración (min) | Tiempo de Estímulo (s) | Ciclo | Modo | Total de Activaciones |
|-------------------|----------------|------------------------|-------|------|-----------------------|
| Guante Izquierdo  | 1              | 10                     | 1     | 2    | 5                     |
| Minibike          | 1              | 10                     | 2     | 2    | 5                     |
| Órtesis de Codo   | 1              | 10                     | 3     | 2    | 5                     |
| 3 Simultáneamente | 1              | 10                     | 4     | 2    | 5                     |

En la Tabla 9, se presentan los resultados del Modo 2, con un tiempo de estimulación de 10 segundos por actuador. El orden de encendido de los actuadores fue lo mismo del modo 1.

### **Estabilidad de comunicación inalámbrica**

En la Tabla 10 se presenta el comportamiento de la comunicación inalámbrica del sistema, específicamente para el minibike y la órtesis de codo.

**Tabla 10**

*Comportamiento de la comunicación inalámbrica según la distancia.*

| Actuador        | Distancia (metros) | Interfaz Gráfica   | Emotiv EPOC X      | Condición de la Señal  |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| Minibike        | 0 - 10             | Sin retardo        | Sin retardo        | Estable                |
| Minibike        | 15                 | Alto retardo       | Alto retardo       | Débil                  |
| Minibike        | 20                 | Sin comunicación   | Sin comunicación   | Total pérdida de señal |
| Órtesis de codo | 0 - 10             | Sin retardo        | Sin retardo        | Estable                |
| Órtesis de codo | 15                 | No se puede probar | No se puede probar | -                      |
| Órtesis de codo | 20                 | No se puede probar | No se puede probar | -                      |

Las pruebas se realizaron para determinar hasta qué distancia funciona adecuadamente el sistema. Se observó que para el minibike, las distancias más cortas (0 - 10 metros) funcionan sin problemas, mientras que a distancias mayores, como 15 y 20 metros, se presentan problemas de comunicación. En el caso de la órtesis de codo, la comunicación se realiza mediante radiofrecuencia, pero como se conecta a un acelerómetro mediante cables, no fue posible realizar pruebas como las del minibike para medir la distancia de funcionamiento.

### **Ensayo de estrés**

En las Tablas 11 y 12 se presentan los resultados de las pruebas de estrés realizadas tanto en el Modo 1 como en el Modo 2.

**Tabla 11**

*Resultados de prueba de estrés (modo 1).*

| Ciclo | Duración (min) | Actuadores                                   | Modo | Total de Activaciones |
|-------|----------------|----------------------------------------------|------|-----------------------|
| 1     | 20             | Guante izquierdo, minibike y órtesis de codo | 1    | 469                   |

En ambas pruebas, se ejecutó un ciclo de terapia con la duración máxima de 20 minutos, durante los cuales los tres actuadores (guante izquierdo, minibike y órtesis de codo) funcionaron simultáneamente.

**Tabla 12**

*Resultados de prueba de estrés (modo 2).*

| Ciclo | Duración (min) | Actuadores                                   | Modo | Total de Activaciones |
|-------|----------------|----------------------------------------------|------|-----------------------|
| 1     | 20             | Guante izquierdo, minibike y órtesis de codo | 2    | 107                   |

Durante las pruebas, el minibike presentó desincronización con los otros dos actuadores en ciertos momentos, lo que afectó su desempeño. Además, la órtesis de codo mostró detenciones aleatorias, lo cual es probablemente causado por la incapacidad del sistema para detectar correctamente el movimiento del acelerómetro utilizado en la prueba.

### **Verificación ante desconexiones repentinas**

Las pruebas que se puede ver en la Tabla 13, se realizaron para determinar hasta qué distancia funciona adecuadamente el sistema.

**Tabla 13**

*Verificación ante desconexiones repentinas.*

| Dispositivo Desconectado | Reacción del Sistema          | Estado del Sistema |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Guante izquierdo         | Se detiene dicho actuador     | Estado seguro      |
| Minibike                 | Se detiene dicho actuador     | Estado seguro      |
| Órtesis de codo          | Se detiene dicho actuador     | Estado seguro      |
| Emotiv EPOC X            | Para de recibir comandos      | Estado seguro      |
| Módulo Electrónico       | Suspende terapia por completo | Estado inseguro    |

Se observó que para el minibike, las distancias más cortas (0 - 10 metros) funcionan sin problemas, mientras que a distancias mayores, como 15 y 20 metros, se presentan problemas de comunicación. En el caso de la órtesis de codo, la comunicación igual es de radiofrecuencia, pero como se conecta a un acelerómetro mediante cables, no fue posible realizar pruebas como las del minibike para medir la distancia de funcionamiento.

## Evaluación de la carcasa

La siguiente prueba se realizó para verificar el aislamiento de la carcasa del dispositivo utilizando un equipo FLUKE 155 10kV INSULATION TESTER. Se aplicaron tres niveles de voltaje: 250, 500 y 1000V respectivamente tanto a la tapa de la carcasa como a la base de la misma.

**Figura 56**

*Primera prueba de aislamiento.*



En la primera prueba se obtuvo una puntuación de 272 tanto en la carcasa como la tapa.

**Figura 57**

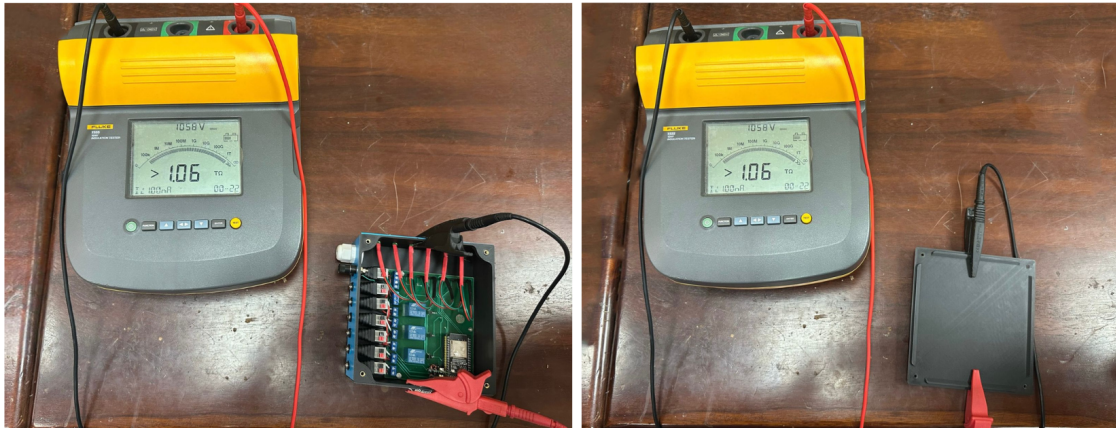
*Segunda prueba de aislamiento.*



En la segunda prueba se obtuvo una puntuación de 534 para los dos elementos.

**Figura 58**

*Tercera prueba de aislamiento.*



Finalmente, en la tercer prueba se obtuvo un puntaje de 1.06 para ambos elementos.

### **7.3.2. Resultados de las pruebas preliminares en sujetos**

Se presenta a continuación la respuesta obtenida del cuestionario SUS sobre la usabilidad del sistema, igual al que se utilizó para las pruebas con la primera versión del sistema, Tabla 3. La Tabla 14, muestra los resultados de los 4 participantes que probaron el rediseño del sistema de rehabilitación robótica controlado por Emotiv EPOC. Los participantes siguieron el protocolo y, después de utilizar el sistema, completaron la encuesta.

**Tabla 14***Respuestas completas del cuestionario SUS del rediseño (P1-P4).*

| <b>No.</b> | <b>Pregunta</b>                                                                        | <b>P1</b> | <b>P2</b> | <b>P3</b> | <b>P4</b> |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1          | Me gustaría usar este sistema con frecuencia                                           | 2         | 2         | 5         | 4         |
| 2          | Encontré el sistema innecesariamente complejo                                          | 3         | 3         | 4         | 5         |
| 3          | Creo que el sistema fue fácil de usar                                                  | 3         | 4         | 5         | 5         |
| 4          | Creo que necesitaría apoyo técnico para usar este sistema                              | 2         | 4         | 5         | 4         |
| 5          | Las funciones del sistema estaban bien integradas                                      | 2         | 3         | 5         | 4         |
| 6          | Me pareció que había demasiada inconsistencia en el sistema                            | 2         | 4         | 3         | 1         |
| 7          | Imagino que la mayoría de las personas aprenderían a usar este sistema muy rápidamente | 3         | 5         | 5         | 3         |
| 8          | Me encontré el sistema muy engorroso de usar                                           | 4         | 3         | 1         | 4         |
| 9          | Me sentí confiado usando el sistema                                                    | 3         | 3         | 5         | 4         |
| 10         | Necesité aprender muchas cosas antes de poder usar el sistema                          | 2         | 3         | 5         | 1         |

Se calculó el puntaje de cada participante, igual que en la sección, “Evaluación de usabilidad mediante SUS - Prototipo 1” y se usó la Tabla 3 para la obtención de la puntuación de cada sujeto.

A partir de los puntajes individuales se obtuvieron estadísticos descriptivos globales: media 57,50, mediana 56,30, desviación estándar 8,90, mínimo 50 y máximo 67,50, lo que indica que la usabilidad percibida del sistema es, la mitad como aceptable y la otra mitad como buena.

**Tabla 15**

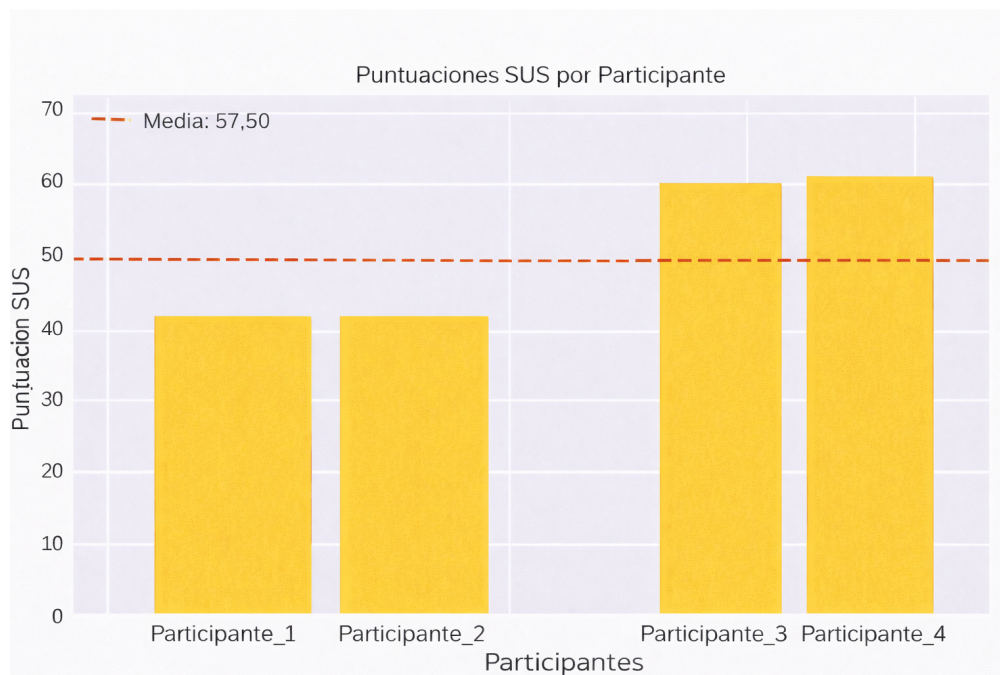
*Resultados individuales SUS por participante del rediseño.*

| <b>Participante</b> | <b>Puntuación SUS</b> | <b>Clasificación</b> | <b>Grado</b> |
|---------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| Participante 1      | 50                    | Aceptable            | C            |
| Participante 2      | 50                    | Aceptable            | C            |
| Participante 3      | 68                    | Buena                | B            |
| Participante 4      | 63                    | Buena                | B            |

La figura 59, muestra las puntuaciones SUS por participante del sistema rediseñado.

**Figura 59**

*Puntuaciones por participante del rediseño.*



La Tabla 16 muestra criterios utilizados para evaluar la activación funcional del sistema tanto del modo 1 y el modo 2 mientras se realizaba las pruebas en sujetos.

**Tabla 16**

*Criterios utilizados para evaluar la activación funcional del sistema.*

| <b>Criterio</b>                       | <b>Evaluación</b>                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reconocimiento de intención           | Durante el modo 1 se obtuvieron un promedio de 7 activaciones y durante el modo 2 se obtuvieron un promedio de 4 activaciones.                                                                                                                         |
| Detección de la expresión facial (ms) | En el modo 2 se tuvo un tiempo de reacción en promedio de los 3 ciclos de 5643,342 ms y un tiempo de reacción mínimo promedio de los tres ciclos de 2329,5 ms y un tiempo de reacción máximo de 9680,583 ms, con un tiempo de estímulo de 10 segundos. |
| Sincronización entre dispositivos     | No se presentó desincronización entre los dispositivos.                                                                                                                                                                                                |
| Movimiento completado                 | El guante robótico, la minibike y la órtesis de codo, tuvieron su ciclo de trabajo controlado por el Emotiv EPOC X.                                                                                                                                    |

## **7.4. Análisis comparativo y discusión de resultados**

### **7.4.1. Análisis de las pruebas técnicas**

Los resultados obtenidos en las pruebas técnicas, presentados en la sección 7.3.1 Pruebas técnicas y resumidos en las Tablas 8, 9, 10, 11, 12, 13, permiten evaluar el desempeño del sistema en términos de activación funcional, estabilidad de la comunicación inalámbrica, comportamiento bajo condiciones de estrés y verificación ante desconexiones repentinas. A continuación, se analizan cada uno de estos aspectos.

#### **Análisis de la activación y respuesta funcional**

En las pruebas, se evaluó cómo respondían los actuadores cuando se les daba la orden de activarse. El guante robótico fue el que más se usó, con 22 activaciones por minuto. Luego estuvo la minibike, con 17, y la órtesis de codo, que activó 16 veces. Esto demuestra que el sistema funciona bien cuando los usuarios activan los dispositivos, respondiendo a las señales que reciben de manera eficaz y sin problemas.

### **Análisis de estabilidad de comunicación inalámbrica**

Se probó si el sistema funcionaba bien a diferentes distancias, y a 10 metros todo estaba perfecto. Pero cuando se aumentaba la distancia, a 15 o 20 metros, empezaron a aparecer retrasos o incluso se perdía la señal, sobre todo con la minibike. Esto indica que el sistema funciona bien a corta distancia, pero a medida que te alejas, la comunicación empieza a fallar.

### **Análisis de ensayo de estrés**

En esta prueba, se pusieron todos los dispositivos a trabajar al mismo tiempo durante 20 minutos. El sistema aguantó bastante bien, con 469 activaciones en el Modo 1, lo que muestra que puede manejar bastante presión sin fallar. En el Modo 2, donde las activaciones son guiadas por un estímulo visual, las activaciones bajaron a 107 ya que solo puede haber un número límite de activaciones por su forma de trabajo.

### **Análisis de verificación ante desconexiones repentinas**

Se probó qué pasaba si algún dispositivo se desconectaba inesperadamente, y el sistema reaccionó bien. Si un actuador se desconectaba, simplemente se detenía, y todo seguía funcionando de manera segura. Sin embargo, cuando se desconectó el módulo principal, el sistema pasó a un estado inseguro, lo que significa que es crucial mantener todas las conexiones funcionando correctamente durante las terapias.

### **Análisis de la evaluación de la carcasa**

se revisó la carcasa del sistema para ver si protegía bien la electrónica. Se hicieron pruebas con voltajes altos para asegurarse de que no se dañara, y la carcasa pasó sin problemas. Esto quiere decir que está bien protegida y puede soportar el uso diario sin sufrir daños.

#### **7.4.2. Análisis de las pruebas preliminares**

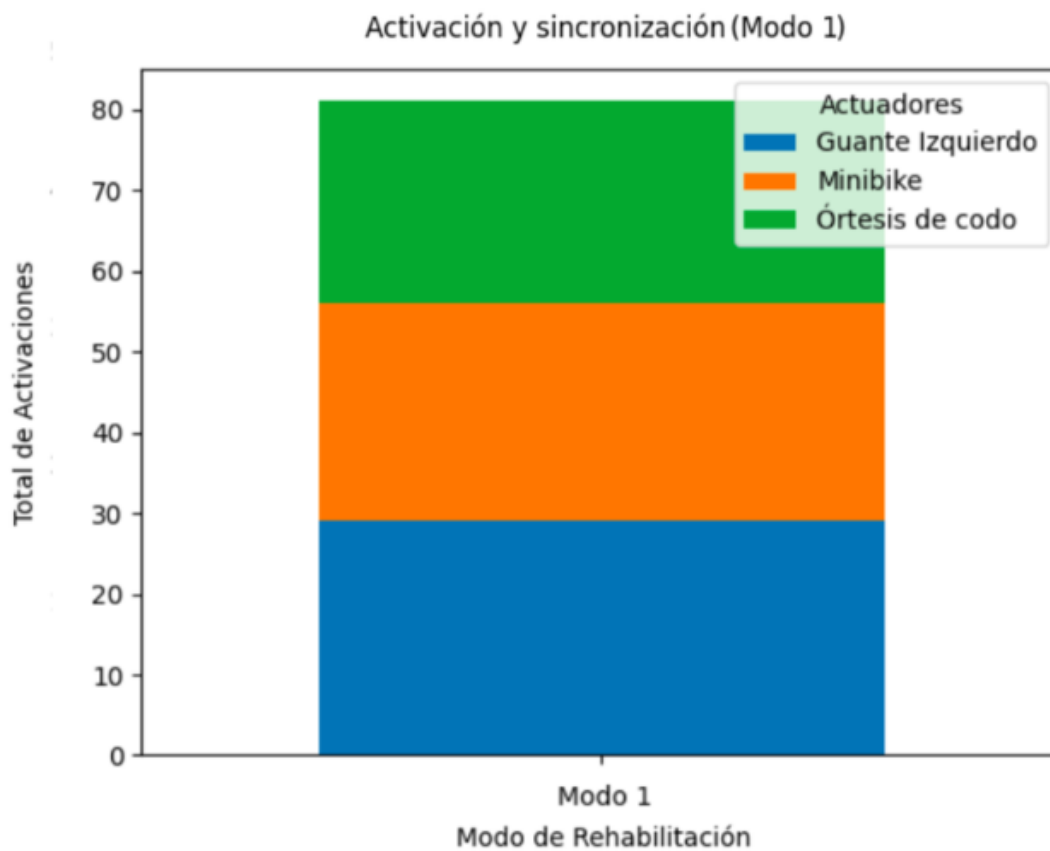
Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los sujetos proporcionan una visión clara del desempeño del sistema. A continuación, se presenta un análisis detallado del mismo.

#### **Activación y sincronización (Modo 1 y Modo 2)**

Las gráficas de barras (Figuras 60 y 61) apiladas muestran que, en el Modo 1, el guante izquierdo fue el actuador más utilizado, seguido por la minibike y la órtesis de codo, lo que sugiere que los participantes prefieren actividades que involucren las manos. En el Modo 2, la distribución de las activaciones fue más equitativa entre los actuadores.

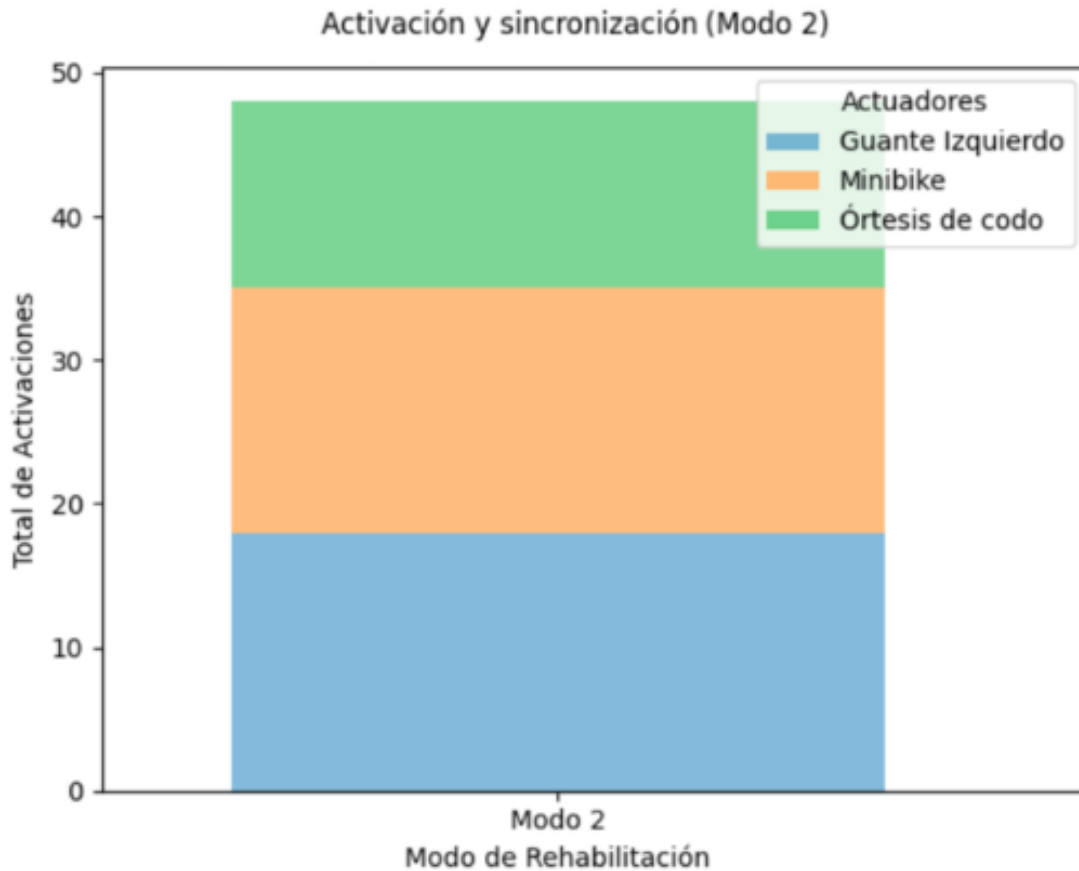
**Figura 60**

*Activación y sincronización (modo 1).*



**Figura 61**

*Activación y sincronización (modo 2).*

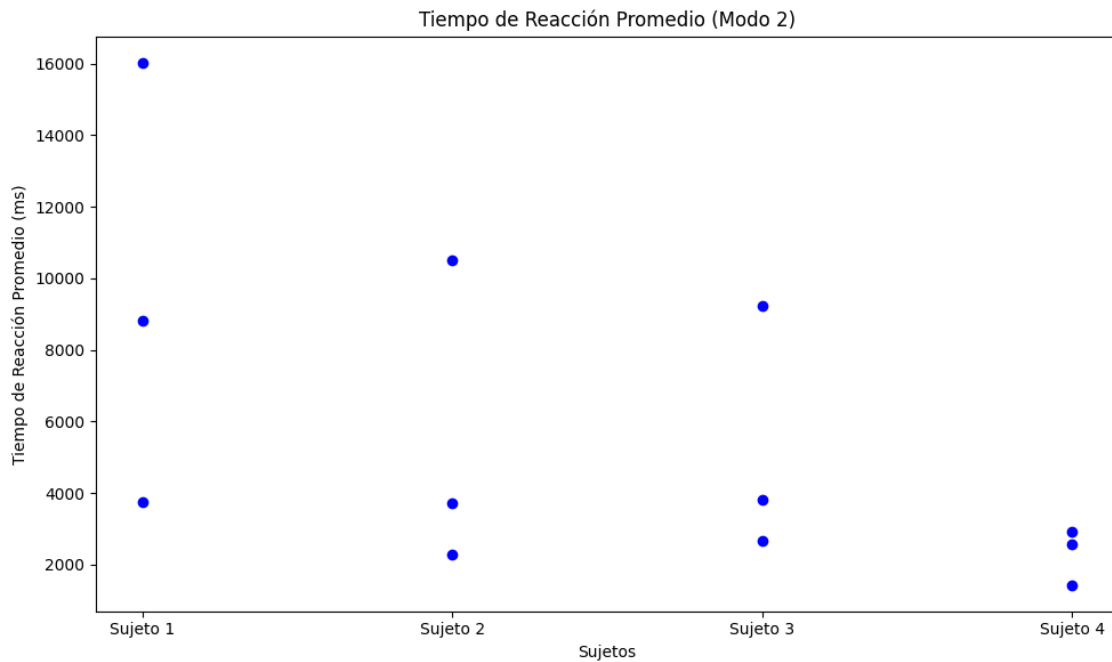


### **Tiempo de Reacción Promedio (Modo 2)**

El gráfico de dispersión (Figura 62) muestra los tiempos de reacción promedio de los sujetos en el Modo 2. Se observó que el sujeto 3 tuvo un tiempo de reacción más alto que los otros tres, lo que podría indicar una mayor dificultad al estímulo visual del Modo 2. Esta diferencia muestra que, aunque la mayoría de los sujetos se adaptaron bien al sistema, algunos experimentan variabilidad en su rendimiento.

## Figura 62

*Tiempo de reacción promedio (modo 2).*

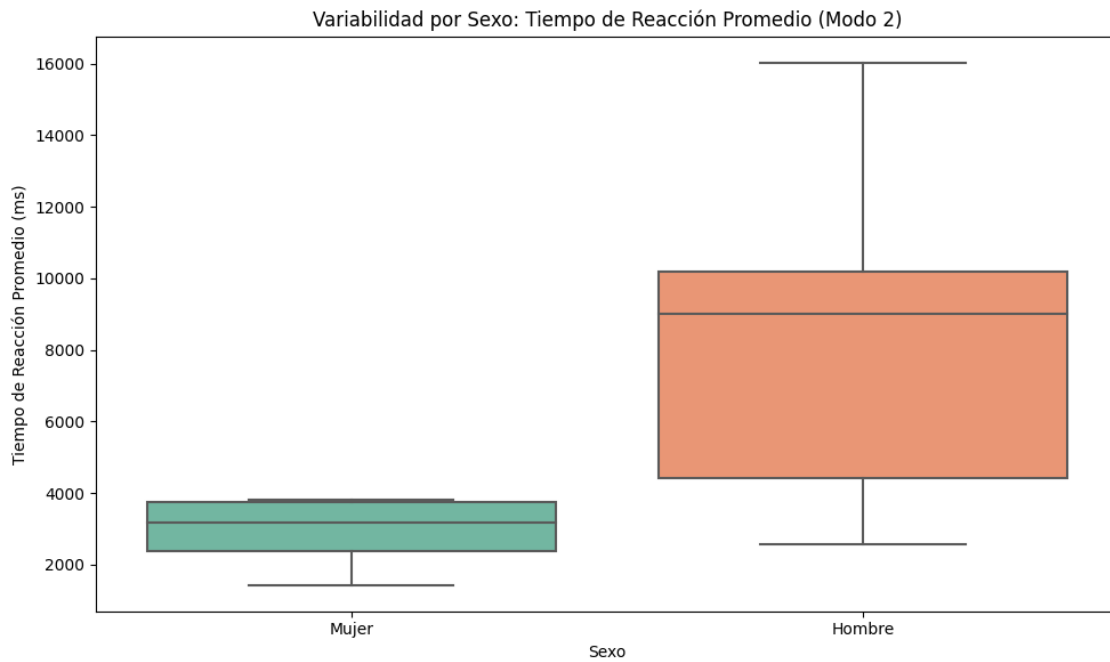


## Variabilidad por Sexo (Modo 2)

En el gráfico de cajas (Figura 63), se compararon los tiempos de reacción promedio entre hombres y mujeres en el Modo 2. Los resultados mostraron que los hombres tenían una mayor variabilidad en sus tiempos de reacción, con un rango mucho más amplio, mientras que las mujeres mostraron tiempos de reacción más consistentes y bajos. Esta diferencia podría ser causada por factores fisiológicos (como el cabello), lo que sugiere que el sistema podría mejorar con ajustes que tengan en cuenta las variaciones individuales en el rendimiento.

### Figura 63

*Variabilidad por sexo (modo 2).*

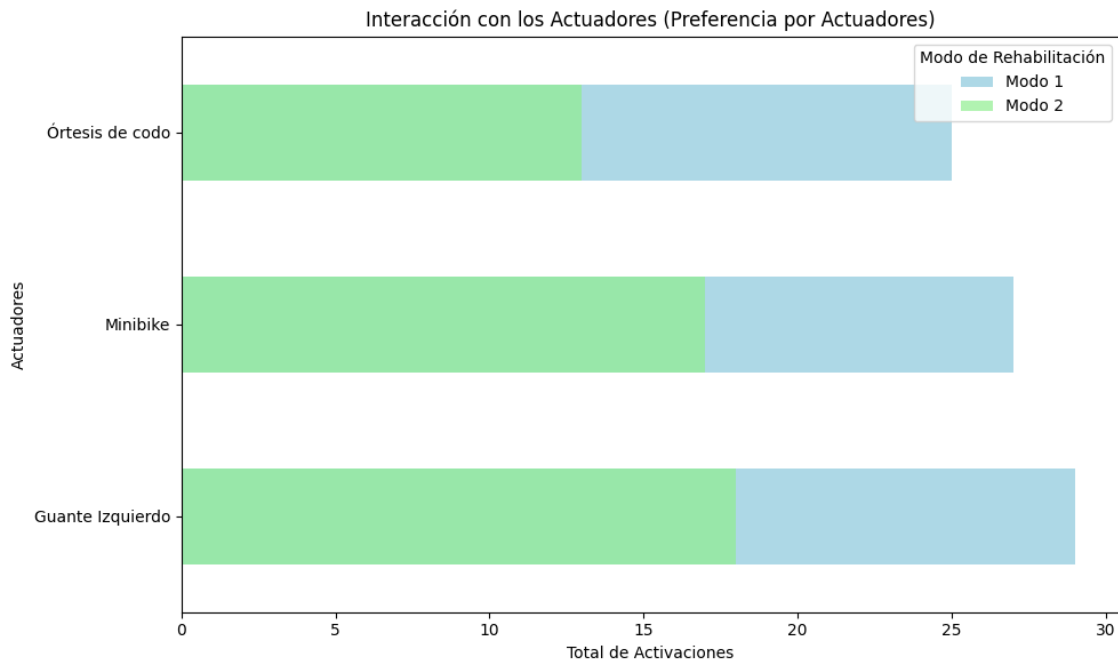


### Interacción con los Actuadores

El gráfico de barras horizontales (Figura 64) ilustra las activaciones totales de cada actuador en los Modo 1 y Modo 2. El guante izquierdo fue, el más utilizado en ambos modos, seguido de la minibike y la órtesis de codo. Estos resultados reflejan la preferencia de los usuarios por los actuadores más fáciles de controlar.

## Figura 64

*Interacción con los actuadores.*

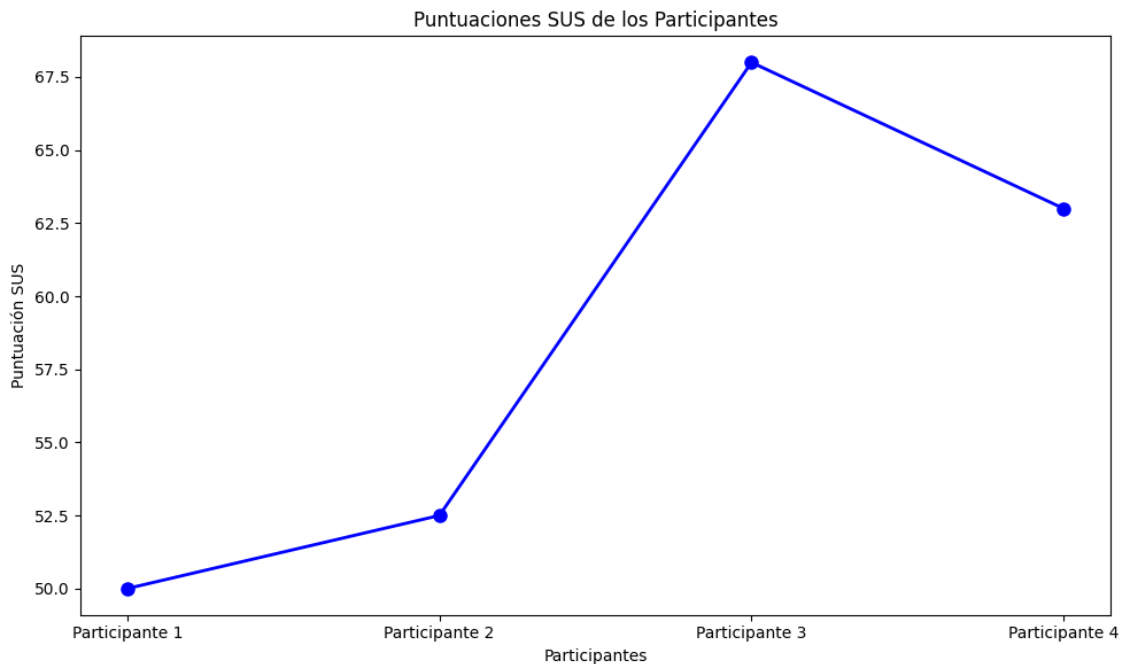


### **Puntuaciones SUS (Usabilidad y comodidad)**

El gráfico de líneas (Figura 65) muestra las puntuaciones del cuestionario SUS de cada participante. Las puntuaciones obtenidas reflejan que la mayoría de los participantes calificaron el sistema como “aceptable”, con puntuaciones cercanas al umbral mínimo de usabilidad. Sin embargo, los participantes 3 y 4 dieron una clasificación más positiva, considerándolo “bueno”. Esto sugiere que el sistema tiene un desempeño aceptable en general, pero con áreas para mejorar en términos de usabilidad y experiencia del usuario.

**Figura 65**

*Usabilidad y comodidad (cuestionario SUS).*



### 7.4.3. Comparación entre las versiones del sistema

Aunque el Prototipo 1 se evaluó con 31 sujetos y obtuvo una puntuación SUS de 74,19, clasificada como “buena”, algunos usuarios encontraron el sistema algo complicado y con una curva de aprendizaje elevada. Por otro lado, el Prototipo 2, probado solo por 4 sujetos, ofreció una experiencia claramente mejor. A pesar de la menor cantidad de participantes, los usuarios destacaron que el sistema era más fácil de usar, más estable y con mejor integración de los actuadores. Aunque la puntuación SUS fue un poco más baja en el Prototipo 2, la mejora en la experiencia del usuario fue evidente, con un diseño más fluido y una mayor estabilidad en el control y la comunicación.

## 8. Presupuesto

En esta sección se detallan los costos asociados al desarrollo y diseño del sistema de rehabilitación motora robótica, incluyendo los gastos en talento humano, equipos, actuadores y componentes necesarios para su funcionamiento.

### 8.1. Talento humano

La Tabla 17 resume el costo estimado del talento humano involucrado en el desarrollo del proyecto.

**Tabla 17**

*Talento humano.*

| <b>Distinción</b> | <b>Precio por hora (USD)</b> | <b>Total de horas</b> | <b>Costo total (USD)</b> |
|-------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Tutora            | 25                           | 20                    | 500,00                   |
| Autora            | 10                           | 240                   | 2400,00                  |
| <b>TOTAL</b>      |                              |                       | <b>2900,00</b>           |

### 8.2. Equipos y actuadores

La Tabla 18 presenta los equipos y actuadores considerados para el sistema, junto con su costo referencial.

**Tabla 18**

*Equipos y actuadores.*

| <b>Componente</b>         | <b>Descripción o fuente</b> | <b>Costo (USD)</b> |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Emotiv EPOC X             | –                           | 999,00             |
| Minibike RYGEO            | –                           | 69,95              |
| Guante robótico Tongboshi | –                           | 99,00              |
| Órtesis de Codo ZB-S1001  | –                           | 331,23             |
| <b>TOTAL</b>              |                             | <b>1499,18</b>     |

### 8.3. Componentes

La Tabla 19 presenta el listado de componentes y materiales requeridos, junto con su costo estimado.

**Tabla 19***Componentes y materiales.*

| Componente                                                                                   | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Cantidad | Precio Unitario (USD) | Precio Total (USD) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|--------------------|
| Módulo ESP32 con conector USB tipo B, driver CP2102, WiFi, Bluetooth, DevKitC ESP32-WROOM-32 | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1        | 9,75                  | 9,75               |
| Módulo GY-521 MPU6050 MPU-6050 Giroscopio Acelerómetro de 6 ejes                             | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1        | 3,50                  | 3,50               |
| Relé SRD-05VDC-SL-C de 5V                                                                    | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 3        | 0,65                  | 1,95               |
| Kit transmisor y receptor de radio frecuencia RF de 433 MHz                                  | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2        | 3,40                  | 6,80               |
| Conector Dc Jack Bornera Cctv A Presion Hembra Negro                                         | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 6        | 0,75                  | 5,25               |
| Bornera KF301 para PCB, color azul, separación 5,08 mm                                       | 8 de 2 pines y 1 de 3 pines                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 6        | 0,20                  | 1,20               |
| 2N2222 Transistor BJT NPN 40V TO-92                                                          | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 3        | 0,09                  | 0,27               |
| LED de 10 mm                                                                                 | 5 color verde y 1 color rojo                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 6        | 0,12                  | 0,72               |
| 1N4007 Diodo rectificador de 1A 1000V DO-41                                                  | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 3        | 0,10                  | 0,30               |
| Peineta header hembra simple, separación 2,54 mm (1x2 a 1x40)                                | 2 de 3 pines y 2 de 4 pines                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 4        | 0,19                  | 0,76               |
| Pulsantes                                                                                    | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2        | 0,60                  | 1,20               |
| Resistencia de montaje superficial                                                           | 6 resistencias de 330 $\Omega$ y 3 resistencias de 1 k $\Omega$                                                                                                                                                                                                                                                                            | 9        | 0,06                  | 0,54               |
| Juego de cables de cobre flexibles                                                           | 22 AWG y 28 AWG                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1        | 17,46                 | 17,46              |
| Carcasa para Módulo Electrónico                                                              | Impresión 3D: \$3/h + \$0,004/g                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1        | 36,51                 | 36,51              |
| Mango para los pulsantes                                                                     | Impresión 3D: \$3/h + \$0,004/g                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2        | 5,67                  | 11,34              |
| Carcasa para Acelerómetro                                                                    | Impresión 3D: \$3/h + \$0,004/g                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1        | 7,26                  | 7,26               |
| Placa Electrónica                                                                            | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1        | 51,00                 | 51,00              |
| Calcomanías                                                                                  | Íconos y símbolos de la carcasa y tapa                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 5        | 1,60                  | 8,00               |
| Materiales Extra                                                                             | Conector jack banana hembra JS-910B para montaje en panel, 7 insertos M2.5 3x3 con tornillos, rollo de estaño (100 g), cinta aislante, pasta para soldar, termoretráctil 1/16 ID 2:1, conector molex 4 pines (macho y hembra), cable AWM Style 2464 24AWG VW-1, 1 conector de montaje roscado, velcro, solución salina (NaCl) 0,9% 1000 mL | –        | –                     | 18,90              |
| <b>TOTAL</b>                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |          |                       | <b>182,71</b>      |

## 9. Conclusiones

El rediseño del sistema de rehabilitación motora robótica controlado por Emotiv EPOC representa un avance significativo en la mejora de la rehabilitación para personas que sufren de secuelas de un accidente cerebrovascular (ACV). Se identificaron fallas en la comunicación entre las señales EEG y los actuadores, lo que causaba desincronización y afectaba la eficiencia del sistema. Con este rediseño, se implementaron mejoras tanto electrónicas como de programación, que han optimizado la estabilidad y precisión del sistema y permitió una interacción más coherente entre la intención del usuario y la respuesta del actuador. La incorporación de una órtesis de codo amplió el rango de movimiento de las extremidades superiores, y mejoró el desarrollo de la terapia en los pacientes que utilizan el sistema.

En cuanto a las pruebas realizadas, los resultados mostraron una mejora en la experiencia de usuario con el nuevo prototipo. El sistema fue capaz de realizar activaciones más consistentes y la respuesta de los actuadores se volvió más precisa, logrando una sincronización adecuada entre los distintos dispositivos. La integración del guante robótico, la minibike y la órtesis de codo, todos controlados mediante señales EEG, permitió ofrecer un enfoque de rehabilitación adaptado a las necesidades de cada paciente. Sin embargo, la comunicación inalámbrica entre algunos actuadores, como la minibike, mostró debilidades a mayores distancias, lo que sugiere una necesidad de optimizar este factor para asegurar una operación más fluida.

El trabajo realizado ha demostrado que la combinación de tecnologías de interfaz cerebro-computadora (BCI), como el Emotiv EPOC, con dispositivos de rehabilitación robótica es prometedora. Sí existen áreas de mejora, especialmente en la integración de los actuadores y la estabilidad de la comunicación a larga distancia. Aún así, el sistema ha mostrado un gran potencial para ser una herramienta de apoyo en terapias de neurorehabilitación, ofreciendo un enfoque innovador para tratar la discapacidad motora post-ACV.

### 9.1. Trabajos futuros

En el futuro, será de agregar otro actuador preferible para la extremidad inferior, ampliando las capacidades del sistema para cubrir más áreas de rehabilitación. También es importante optimizar el sistema integrando un módulo de carga eficiente, lo que permitiría que el sistema sea menos dependiente de conexiones físicas constantes. Con esto, se podría utilizar un microcontrolador como un Raspberry Pi, que permitiría mejorar el rendimiento y facilitar la

expansión de las funcionalidades del sistema. Una actualización de los actuadores, como el minibike, a tecnologías más complejas podría mejorar la precisión de la terapia robótica y brindar un mayor control sobre los movimientos de los pacientes durante su rehabilitación.

## **10. Recomendaciones**

- Realizar estudios a largo plazo para evaluar los efectos de la terapia robótica en la recuperación motora.
- Optimizar la comunicación inalámbrica entre los actuadores para mejorar la estabilidad a mayores distancias.
- Actualizar los componentes del sistema de manera regular para asegurar que siga siendo efectivo en la terapia.
- Mejorar la interfaz de terapia para facilitar su utilización por parte de los profesionales de salud.

## Referencias

- Alessandro, L., Olmos, L. E., Bonamico, L., Muzio, D. M., Ahumada, M. H., Russo, M. J., et al. (2020). Multidisciplinary rehabilitation for adult patients with stroke. *Medicina (Buenos Aires)*, *80*(1), 54–68.
- Ambrosini, E., Gasperini, G., Cacioppo, V., Strbac, M., Squillace, M., Tieri, G., & Ferrante, S. (2021). Robot-assisted cycling for treating post-stroke lower-limb disability: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *18*(1), 1–16.
- Bach-y-Rita, P., & Bach-y-Rita, E. W. (1997). Neural plasticity after brain injury. *Neuroplasticity*, *1*(1), 1–15.
- Badcock, N. A., Preece, K. A., deWit, B., Glenn, K., Fieder, N., Thie, J., & McArthur, G. (2015). Validation of the Emotiv EPOC EEG system for research quality auditory event-related potentials in children. *PeerJ*, *3*, e907. <https://doi.org/10.7717/peerj.907>
- Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. T. (2009). Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of Usability Studies*, *4*(3), 114–123. <https://uxpajournal.org/determining-what-individual-sus-scores-mean-adding-an-adjective-rating-scale/>
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2022). *Getting started with Arduino* (4th ed.). Maker Media.
- Bastos-Filho, T. F., da Silva, A. G., dos Santos, J. C., & Barros, A. K. (2024). Active hand orthosis control using EEG-based brain–computer interface and kinesthetic motor imagery. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *21*(3), 145–158. <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01145-8>
- Bastos-Filho, T., Villa-Parra, A., Guerrero-Méndez, C., González-Cely, A., Blanco-Díaz, C., Delisle-Rodríguez, D., & Igasaki, T. (2024). A novel methodology based on static visual stimuli and kinesthetic motor imagery for upper limb neurorehabilitation. *Research on Biomedical Engineering*, *40*, 1–15.
- Biasiucci, A., Leeb, R., Iturrate, I., Perdakis, S., Al-Khodairy, A., Corbet, T., Schnider, A., Schmidlin, T., Zhang, H., Bassolino, M., Viceic, D., Vuadens, P., Guggisberg, A. G., & Millán, J. d. R. (2018). Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke. *Nature Communications*, *9*, Article 2421. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04673-z>

- Brooke, J. (1996). SUS: A “quick and dirty” usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & I. L. McClelland (Eds.), *Usability evaluation in industry* (pp. 189–194). Taylor & Francis.
- Caunedo Suárez, E. (2023). *Nuevas tecnologías en neurorrehabilitación del paciente con ictus: Una revisión bibliográfica* (Trabajo Fin de Grado, Universidad de Oviedo).
- Cerón, J., Bravo, J., Palacios, D., & Gutiérrez, S. (2023). Evaluación del potencial del Emotiv EPOC+ en entornos de neurotecnología y educación superior. *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento*, 7(1), 96–111.  
<https://doi.org/10.2348/jci.2023.0121>
- Cerón, C., Bravo, J., Palacios, D., & Gutiérrez, M. (2023). Aplicaciones del Emotiv EPOC en interfaces cerebro-computadora y neurorehabilitación clínica. *Revista de Neurociencia Aplicada*, 12(2), 34–47.
- Client challenge. (s. f.).<https://www.scribd.com/document/697840736/Neuroplasticidad-Mapa-conceptual>
- Cramer, S. C., Sur, M., Dobkin, B. H., O’Brien, C., Sanger, T. D., Trojanowski, J. Q., Rumsey, J. M., Hicks, R., Cameron, J., Chen, D., Chen, W. G., Cohen, L. G., deCharms, C., Duffy, C. J., Eden, G. F., Fetz, E. E., Filart, R., Freund, M., Grant, S. J., . . . Vinogradov, S. (2011). Harnessing neuroplasticity for clinical applications. *Brain*, 134 (Pt 6), 1591–1609. <https://doi.org/10.1093/brain/awr039>
- Cramer, S. C., & Sur, M. (2019). Harnessing neuroplasticity for clinical applications. *Brain*, 142(6), 1430–1447. <https://doi.org/10.1093/brain/awz123>
- Daly, J. J., & Wolpaw, J. R. (2008). Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology*, 7(11), 1032–1043.  
[https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(08\)70223-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(08)70223-0)
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. Plenum.
- Elbow flexion and extension training equipment arm arm upper limb rehabilitation bending and straightening exercise Home - AliExpress 18. (s. f.). Aliexpress.  
<https://es.aliexpress.com/i/1005006276515961.html>
- Elsner, B., Kugler, J., Pohl, M., & Mehrholz, J. (2022). Transcranial direct current stimulation for improving function and activities after stroke. *Cochrane Database of*

- Systematic Reviews*, (5), CD009645.  
<https://doi.org/10.1002/14651858.CD009645.pub3>
- Emotiv. (s. f.). *Cortex API documentation*. <https://emotiv.gitbook.io/cortex-api/>
- Emotiv. (s. f.). *Technical specifications | EPOC X User Manual*.  
<https://emotiv.gitbook.io/EPOC-x-user-manual/introduction/technical-specifications>
- Emotiv Systems. (2019). Emotiv EPOC user manual and developer documentation. Emotiv Inc.
- Fernández Martínez, L., et al. (2021). Fundamentos teóricos, metodológicos y prácticos de la rehabilitación cognitiva en adultos con daño cerebral adquirido. *Revista Cubana de Medicina Física y Rehabilitación*, 13(2), e531.  
<https://revrehabilitacion.sld.cu/index.php/reh/article/view/531>
- Fette, I., & Melnikov, A. (2011). The WebSocket Protocol (RFC 6455). *Internet Engineering Task Force (IETF)*. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6455>
- Grefkes, C., & Fink, G. R. (2016). Reorganization of cerebral networks after stroke: New insights from neuroimaging with connectivity approaches. *Brain*, 139(5), 1263–1278.  
<https://doi.org/10.1093/brain/aww028>
- Grefkes, C., & Fink, G. R. (2020). Recovery from stroke: Current concepts and future perspectives. *Neurological Research and Practice*, 2, 17.
- Gutiérrez Ortiz, K. M., & Pomaquiza Chiriboga, A. S. (2025). *Sistema para rehabilitación robótica controlado por Emotiv EPOC (UPS-CT012207)* [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana].
- Heo, P., Lee, S. J., Gu, G. M., Kim, S., & Lee, S. (2022). Soft robotic glove for rehabilitation of hand function: A systematic review of technology and clinical evidence. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 19(1), 1–20.  
<https://doi.org/10.1186/s12984-022-01069-2>
- Henao, L., & Martínez, A. (2020). Uso de videojuegos comerciales en la rehabilitación motora post-ACV: una revisión sistemática. *Revista Colombiana de Rehabilitación*, 19(1), 45–53. <https://doi.org/10.30788/RevColRehab.2020.19.1.45>
- International Electrotechnical Commission. (2012). *Medical electrical equipment—Part 1: General requirements for basic safety and essential performance (IEC*

60601-1:2005+A1:2012). IEC.

- International Organization for Standardization. (2016). *Medical devices—Quality management systems—Requirements for regulatory purposes (ISO 13485:2016)*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2019). *Medical devices—Application of risk management to medical devices (ISO 14971:2019)*. ISO.
- Khan, M. A., Fares, H., Ghayvat, H., Brunner, I. C., Puthusserypady, S., Razavi, B., . . . Meador, K. J. (2023). A systematic review on functional electrical stimulation based rehabilitation systems for upper limb post-stroke recovery. *Frontiers in Neurology, 14*, 1272992.
- Kim, S., Lee, M., Park, J., & Cho, J. (2022). EEG-based brain–computer interfaces for rehabilitation of stroke patients: A systematic review. *Frontiers in Human Neuroscience, 16*, 824563. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.824563>
- Kim, T., Park, S., & Lee, S. (2022). Patient engagement in BCI-based stroke rehabilitation. *Frontiers in Human Neuroscience, 16*, 901345. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.901345>
- Klarner, T., & Zehr, E. P. (2018). Modulation of interlimb reflexes during rhythmic locomotor tasks. *Journal of Neurophysiology, 120*(2), 1078–1092. <https://doi.org/10.1152/jn.00204.2018>
- Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: Implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 51*(1), S225–S239.
- Kolb, B., & Gibb, R. (2020). *Brain plasticity and behavior*. Routledge.
- Kolb, B., & Gibb, R. (2020). Neuroplasticity and behavior: A review. *Journal of Clinical Neuroscience, 79*, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2020.05.010>
- Kuriakose, D., & Xiao, Z. (2020). Pathophysiology and treatment of stroke: Present status and future perspectives. *International Journal of Molecular Sciences, 21*(20), 7609.
- Langhorne, P., Bernhardt, J., & Kwakkel, G. (2011). Stroke rehabilitation. *The Lancet, 377*(9778), 1693–1702. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60325-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60325-5)
- Langhorne, P., Coupar, F., & Pollock, A. (2011). Motor recovery after stroke: A systematic review. *The Lancet Neurology, 8*(8), 741–754. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(09\)70150-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(09)70150-4)

- Laver, K. E., Lange, B., George, S., Deutsch, J. E., Saposnik, G., & Crotty, M. (2021). Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (11), CD008349. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008349.pub3>
- Laver, K. E., George, S., Thomas, S., Deutsch, J. E., & Crotty, M. (2020). Telerehabilitation services for stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*.
- Liao, Y., Vakanski, A., & Xian, M. (2019). A deep learning framework for assessing physical rehabilitation exercises. *arXiv* (arXiv:1901.10435).
- Lo, A. C., Guarino, P. D., Richards, L. G., Haselkorn, J. K., Wittenberg, G. F., Federman, D. G., Ringer, R. J., Wagner, T. H., Krebs, H. I., Volpe, B. T., Bever, C. T., Bravata, D. M., Duncan, P. W., Corn, B. H., Maffucci, A. D., Nadeau, S. E., Conroy, S. S., Powell, J. M., Huang, G. D., & Peduzzi, P. (2010). Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. *The New England Journal of Medicine*, 362(19), 1772–1783. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa0911341>
- López-Larraz, E., Pons, J. L., & Montoya, P. (2020). Control of robotic exoskeletons by EEG-based brain–computer interfaces. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(2), 328–337. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2968298>
- López-Larraz, E., Ray, A. M., Figueiredo, T. C., Birbaumer, N., Ramos-Murguialday, A., & Spüler, M. (2020). Brain–machine interfaces for rehabilitation in stroke: A review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17(1), 123–140. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00700-0>
- Loureiro, R. C. V., Harwin, W. S., Nagai, K., & Johnson, M. (2014). Advances in upper limb stroke rehabilitation: A technology push. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 52(4), 259–274. <https://doi.org/10.1007/s11517-014-1142-0>
- Lum, P. S., Burgar, C. G., Shor, P. C., Majmundar, M., & Van der Loos, M. (2012). Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(2), 230–236.
- Mehrholz, J., Pohl, M., Platz, T., Kugler, J., & Elsner, B. (2020). Electromechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (11). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006876.pub4>

- Mesonero, L. L., & Sánchez, C. O. (2019). Accidentes cerebrovasculares. En J. Seco Calvo (Ed.), *Sistema nervioso: métodos, fisioterapia clínica y afecciones para fisioterapeutas* (pp. 87–96). Editorial Médica Panamericana.
- Mridha, M. F., Das, S. C., Kabir, M. M., Lima, A. A., Islam, M. R., & Watanobe, Y. (2021). Brain–computer interface: Advancement and challenges. *Sensors*, *21*(17), 5746. <https://doi.org/10.3390/s21175746>
- Neurotech. (2024). *Manual de integración HITI Brain para dispositivos Emotiv EPOC*. Grupo HITI Neurotech. <https://www.hitineurotech.com>
- Pfurtscheller, G., Müller-Putz, G. R., Schlögl, A., & Neuper, C. (2010). Rehabilitation with brain–computer interface systems. *Computer*, *43*(10), 58–65. <https://doi.org/10.1109/MC.2010.254>
- Ramadan, R. A., & Vasilakos, A. V. (2015). Brain–computer interface: Control signals review. *Neurocomputing*, *223*, 26–44. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.10.024>
- Ramos-Murguialday, A., Broetz, D., Rea, M., Läer, L., Yilmaz, Ö., Brasil, F. L., Liberati, G., Curado, M. R., Garcia-Cossio, E., Vyziotis, A., Cho, W., Agostini, M., Soares, E., Soekadar, S. R., Caria, A., Cohen, L. G., & Birbaumer, N. (2013). Brain–machine interface in chronic stroke rehabilitation: A controlled study. *Annals of Neurology*, *74*(1), 100–108. <https://doi.org/10.1002/ana.23879>
- Ramos-Murguialday, A., Broetz, D., Rea, M., Läer, L., Yilmaz, Ö., Brasil, F. L., & Birbaumer, N. (2019). Brain–machine interface in chronic stroke rehabilitation: A controlled study. *Annals of Neurology*, *85*(3), 484–496. <https://doi.org/10.1002/ana.25432>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, *55*(1), 68–78. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.68>
- RYGEO Medical. (2020). Minibike RYGEO: Assisted pedaling device for rehabilitation and motor training. RYGEO Medical Equipment.
- Tongboshi Rehabilitation. (2021). Robotic hand rehabilitation glove: Product description and clinical application. Tongboshi Medical Technology Co., Ltd.
- Tonin, A., Carlson, T., & del R. Millán, J. (2025). Brain–computer interfaces for stroke motor rehabilitation. *Frontiers in Neuroscience*.

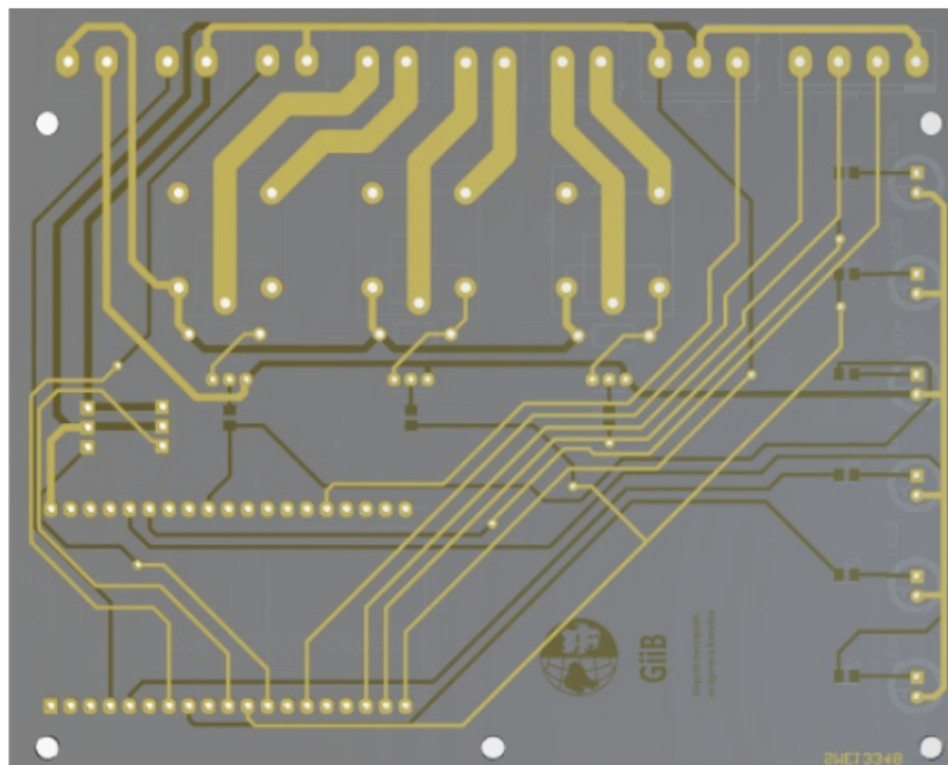
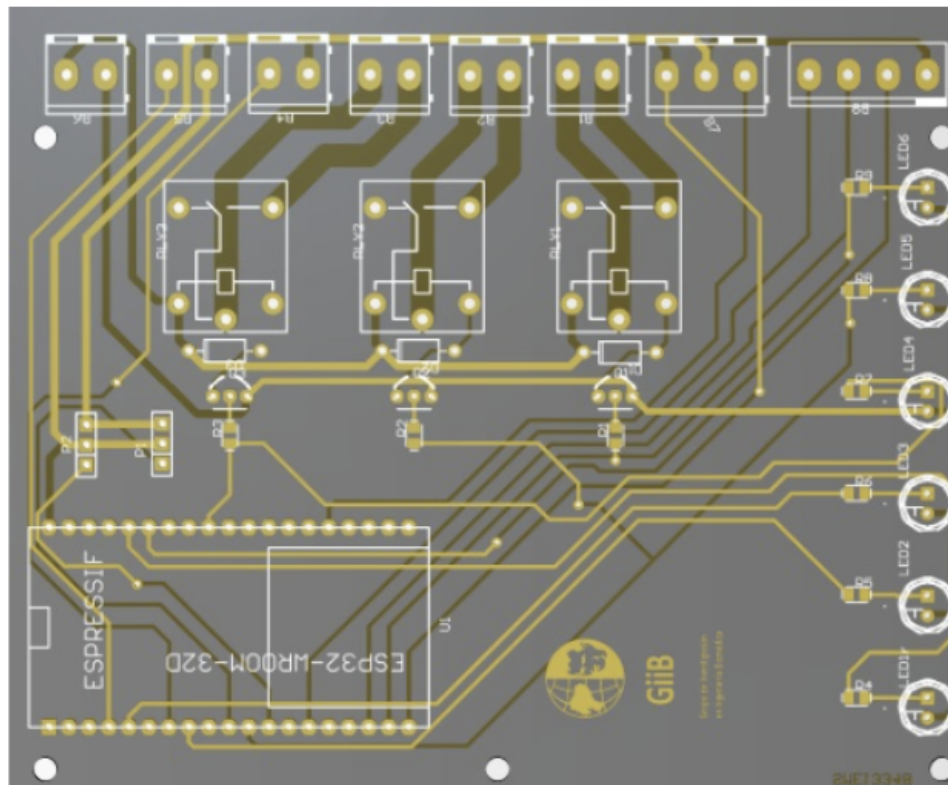
- U.S. National Library of Medicine. (2025, August 1). *Accidente cerebral (ACV) / accidente cerebrovascular (información en español)*. MedlinePlus.  
<https://medlineplus.gov/spanish/stroke.html>
- Veerbeek, J. M., Langbroek-Amersfoort, A. C., van Wegen, E. E. H., Meskers, C. G. M., & Kwakkel, G. (2017). Effects of robot-assisted therapy for the upper limb after stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 31(2), 107–121.  
<https://doi.org/10.1177/1545968316666957>
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain–computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767–791. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3)
- World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 310(20), 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

# **ANEXOS**

## Anexo A: Firmware del ESP32 para recepción de comandos y control de actuadores

```
1 #include <RCSwitch.h>
2 #include <Adafruit MPU6050.h>
3 #include <Adafruit_Sensor.h>
4 #include <Wire.h>
5
6 // --- Instancias ---
7 RCSwitch rfMinibike;
8 RCSwitch rfBrazo;
9 Adafruit MPU6050 mpu;
10
11 // =====
12 //          DEFINICIÓN DE PINES
13 // =====
14 const int ledMinibike = 2;
15 const int ledGuante = 27;
16 const int ledActuador = 16;
17 const int ledGuanteDer = 18;
18 const int ledFuturo = 23;
19 const int ledEstimulo = 13;
20
21 // Salidas RF
22 const int PIN_RF_MINIBIKE = 5;
23 const int PIN_RF_BRAZO = 19;
24
25 // Entradas Físicas
26 const int PIN_BTN_TOGGLE = 4;
27 const int PIN_BTN_PARO = 15;
28 const int PIN_ANALOGICO = 34;
29
30 // =====
31 //          CONFIGURACIÓN RF
32 // =====
33 const unsigned long CODIGO_MB_ENCENDER = 11554817;
34 const unsigned long ARM_EXTENDER = 550372;
35 const unsigned long ARM_DETENER = 550370;
36 const unsigned long ARM_CONTRACCION = 550369;
37
38 // --- CALIBRACIÓN MPU6050 ---
39 float y_brazo_extendido = -9.27;
40 float y_brazo_doblado = 5.09;
41
42 // =====
43 //          VARIABLES
44 // =====
45 String inputString = "";
46 bool mensajeCompleto = false;
47 bool terapiaActiva = false;
48
49 bool mpuOnline = false;
50
51 unsigned long tiempoInicio = 0;
52 unsigned long duracion = 0;
53
54 // Configuración
55 int modo = 1;
56 // fut = Variable para el AUX (Actuador independiente)
57 int mb=0, g=0, gd=0, act=0, fut=0, ana=0;
58 int contadorActivaciones = 0;
59 int contadorToggle = 0;
60
61 // Estado Ortesis
62 bool brazoMoviendo = false;
63 bool brazoSubiendo = true;
64 int anguloActual = 0;
65 unsigned long ultimoCheckSensor = 0;
66
67 // Filtros Ortesis
68 unsigned long tiempoEnLimiteSuperior = 0;
```

## Anexo B: Placa PCB con agujeros de succión en Altium



# **Anexo C: Consentimiento Informado para la realización de pruebas del Sistema para Rehabilitación Robótica Controlado por Emotiv EPOC**

**Investigadora:** Heather Pamela Ulloa Cabrera

**Directora del trabajo de titulación:** Ing. Ana Cecilia Villa Parra, PhD.

**Nombre de la Organización:** Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB)

**Nombre de la Propuesta:** REDISEÑO DE UN MÓDULO ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL DE UN SISTEMA DE REHABILITACIÓN MOTORA ROBÓTICA CON EMOTIV EPOC

**Este Documento de Consentimiento Informado tiene dos partes:**

- I. Información (proporciona información sobre el estudio).
- II. Formulario de Consentimiento (para firmar si está de acuerdo en participar).

Se le dará una copia del Documento completo de Consentimiento Informado.

## **PARTE I: Información**

Soy Heather Pamela Ulloa Cabrera, colaboro con el grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB) de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS). Me encuentro realizando mi trabajo de titulación para la obtención del título de Ingeniera Biomédica de la Universidad Politécnica Salesiana, enfocado en el campo de la neurorehabilitación. Le voy a brindar información e invitarle a participar de la evaluación del sistema. Antes de decidirse, puede hablar con la tutora de mi proyecto la Ingeniera Ana Cecilia Villa Parra, PhD. sobre la investigación. En el caso si existen palabras que no entienda, podemos detenernos mientras les informamos para ampliar la explicación. Además, si tienen preguntas más tarde puede preguntar a mi tutora o a nosotros.

## **Propósito**

El sistema para rehabilitación controlado por Emotiv EPOC, surge ante la necesidad de maximizar la neuroplasticidad y mejorar la funcionalidad de pacientes con daño neurológico, requiriendo de realizar pruebas preliminares sobre sistema de rehabilitación robótica compuesto por un guante robótico Tongboshi, una mini bicicleta RYGEO y una órtesis de codo ZB-S1001, para asegurar que el prototipo cumpla con los criterios mínimos de funcionalidad técnica y usabilidad antes de su implementación en escenarios clínicos reales. Estas pruebas

permitan validar la comunicación entre los módulos (hardware y software) y comprobar que el sistema responde adecuadamente a los comandos en ambos módulos de operación: voluntario y mediante estímulo visual.

### **Participación Voluntaria**

Participación en esta investigación es totalmente voluntaria. Usted puede elegir participar o no hacerlo. Usted puede cambiar de idea más tarde y deja de participar aun cuando haya aceptado antes.

### **Procedimientos y protocolos**

La sesión durará alrededor de 20 minutos y se divide en dos fases. En la primera fase, se configura el Emotiv EPOC X, se humedece y colocan los electrodos de dicho dispositivo en el sujeto y se verifica la calidad de la señal cerebral ( $\geq 80\%$ ). Luego se conecta el módulo electrónico, se configura el servicio Cortex API para reaccionar a estímulos (como “*clench teeth*”) y se selecciona el módulo de trabajo.

La segunda fase consiste en la ejecución de las siguientes rutinas. En la Rutina 1 se ejecutará módulo de trabajo 1 en el que el paciente controla los dispositivos a su voluntad por 3 minutos, dividimos de la siguiente forma: 1 minuto con el guante robótico, 1 minuto con la minibike y 1 minuto con la órtesis de codo. En la Rutina 2 ejecutará el módulo de trabajo 2 en el que el participante activa los dispositivos mediante estímulos visuales (encendido de un LED) cada 10 segundos durante un periodo de 1 minuto, repitiendo la secuencia de control de los dispositivos guante robótico, minibike y órtesis de codo de la rutina anterior. Al finalizar cada rutina, los datos se guardada en un archivo .xlsx para su análisis. Una vez finalizada las pruebas, se procede a la entrega del cuestionario SUS a cada participante, para recopilar información sobre la usabilidad del dispositivo.

## **PARTE II:**

### **CONSENTIMIENTO INFORMADO**

Yo \_\_\_\_\_,

declaro que he sido informado he invitado a participar en una investigación denominado **RE-DISEÑO DE UN MÓDULO ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL DE UN SISTEMA DE REHABILITACIÓN MOTORA ROBÓTICA CON EMOTIV EPOC**, este es un dispositivo

que cuenta con el respaldo del grupo de investigación de Ingeniería Biomédica (GIIB) de la Universidad Politécnica Salesiana. Entendido que este estudio busca conocer la funcionalidad que tiene el sistema de cumplir el propósito para el cual fue diseñada, además de observar como a las personas utilizan el mismo, para detectar las mejoras potenciales y la percepción de los usuarios. Sé que mi participación se llevará a cabo el día \_\_\_\_\_, en el horario \_\_\_\_\_ y consistirá en ejecutar el protocolo que se me ha socializado y responder una encuesta. Me han explicado que la información registrada no será confidencial, pero que mi información personal sí.

Estoy en conocimiento que los datos no me serán entregados y que no habrá retribución por la participación en este estudio, que esta información se procesará y usará en el beneficio de la UPS y la sociedad dada la investigación que se está llevando a cabo. Soy consciente de que puedo declinar mi participación o retirarme en cualquier etapa de la investigación, sin expresión de causa ni consecuencias negativas para mí.

He leído la información proporcionada y entendido la oportunidad de preguntar sobre ella, se me ha respondido satisfactoriamente las preguntas que he realizado. Consiento voluntariamente mi participación en esta investigación y recibido una copia del presente documento.

**Nombre del Participante:** \_\_\_\_\_

**Firma del participante:** \_\_\_\_\_

**Fecha:** \_\_\_\_\_ (Día/Mes/Año)

## Anexo D: Cuestionario SUS - Escala de Usabilidad del Sistema

**Instrucciones:** Para cada afirmación, marque un número del 1 (totalmente en desacuerdo) al 5 (totalmente de acuerdo).

1. Me gustaría usar este sistema con frecuencia.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

2. Encontré el sistema innecesariamente complejo.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

3. Creo que el sistema fue fácil de usar.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

4. Creo que necesitaría apoyo técnico para usar este sistema.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

5. Las funciones del sistema estaban bien integradas.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

6. Me pareció que había demasiada inconsistencia en el sistema.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

7. Imagino que la mayoría de las personas aprenderían a usar este sistema muy rápidamente.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

8. Encontré el sistema muy difícil de usar.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

9. Me sentí confiado usando el sistema.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

10. Necesité aprender muchas cosas antes de poder usar el sistema.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|   |   |   |   |   |

# Anexo E: Protocolo de Pruebas - Sistema de Rehabilitación Robótica Controlado por Emotiv EPOC

## PROTOCOLO DE PRUEBAS - Sistema de Rehabilitación Robótica Controlado Por Emotiv EPOC



Heather Pamela Ulloa Cabrera  
Estudiante de Ingeniería Biomédica

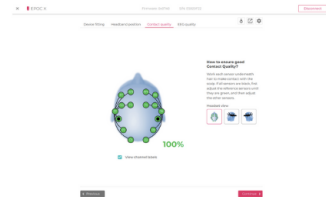
### 1 PREPARAR EL DISPOSITIVO EMOTIV EPOC

- Remojar los electrodos por 10 minutos en solución salina.
- Colocar los electrodos en el casco Emotiv EPOC.
- Colocar el caso Emotiv EPOC en el paciente.



### 2 CONFIGURAR EL SOFTWARE EMOTIV LAUNCHER Y CORTEX API

- Verificar la calidad de contacto de los electrodos para obtener una captura de señales con un porcentaje de efectividad de  $\geq 80\%$ .
- Conectar la computadora con el módulo.
- Conectar software Emotiv EPOC Launcher con el servicio Cortex API.



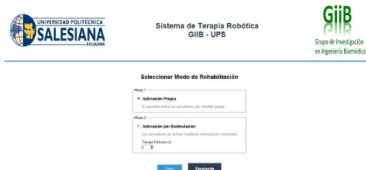
### 3 ABRIR EL PROGRAMA DE LA INTERFAZ DE RUTINA

- Llenar los datos de la interfaz de la rutina.
- Regular el threshold adecuado para el paciente.



### 4 SELECCIONAR EL MODO DE TRABAJO 1

- Permite al paciente activar y desactivar los actuadores voluntariamente.



### 5 CREAR LA SESIÓN DE LA RUTINA

- Sesión 1: Solo guante robótica.
- Sesión 2: Solo minibike.
- Sesión 3: Solo órtesis de codo.



### 6 SELECCIONAR EL MODO DE TRABAJO 2

- Permite al paciente accionar los actuadores guiado por medio de un estímulo visual (LED).
- Realizará la actividad por el tiempo de cada 10s durante 1 minuto.



### 7 CREAR LA SESIÓN DE LA RUTINA

- Sesión 1: Solo guante robótica.
- Sesión 2: Solo minibike.
- Sesión 3: Solo órtesis de codo.



### 8 FINALIZAR RUTINAS Y GUARDAR LOS DATOS

- Guardar los datos de las rutinas en un archivo .xlsx.

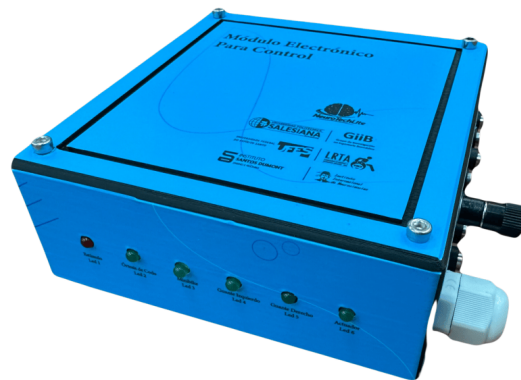


# Anexo F: Manual de Usuario - Sistema de control de terapia robótica

## Manual de Usuario Sistema de Control de Terapia Robótica

Fabricante: Heather Pamela Ulloa Cabrera

Versión 2.0 — Febrero 2026



# Índice

|          |                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introducción</b>                                     | <b>3</b>  |
| 1.1      | Propósito del Dispositivo . . . . .                     | 3         |
| 1.2      | Advertencias de Seguridad . . . . .                     | 3         |
| <b>2</b> | <b>Simbología Utilizada en el Sistema</b>               | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Componentes del Sistema</b>                          | <b>5</b>  |
| <b>4</b> | <b>Indicadores LED</b>                                  | <b>6</b>  |
| <b>5</b> | <b>Conectores del Sistema</b>                           | <b>7</b>  |
| <b>6</b> | <b>Uso del Dispositivo</b>                              | <b>7</b>  |
| 6.1      | Configuración Inicial . . . . .                         | 7         |
| 6.2      | Configuración del Emotiv Pro . . . . .                  | 8         |
| 6.3      | Configuración del Software . . . . .                    | 9         |
| 6.3.1    | Configuración de la API Cortex de Emotiv EPOC . . . . . | 9         |
| 6.4      | Programar Rutina Terapéutica . . . . .                  | 10        |
| 6.5      | Monitoreo y Control de Sesiones . . . . .               | 11        |
| <b>7</b> | <b>Mantenimiento</b>                                    | <b>11</b> |
| 7.1      | Mantenimiento General . . . . .                         | 11        |
| 7.2      | Limpieza del Sistema . . . . .                          | 12        |
| 7.2.1    | Recomendaciones de Limpieza: . . . . .                  | 12        |
| 7.3      | Alimentación Eléctrica . . . . .                        | 12        |
| 7.4      | Mantenimiento del Sistema Electrónico . . . . .         | 13        |
| 7.5      | Mantenimiento por Dispositivo . . . . .                 | 13        |
| <b>8</b> | <b>Solución de Problemas</b>                            | <b>14</b> |
| <b>9</b> | <b>Diagrama de Conexiones</b>                           | <b>16</b> |

# 1 Introducción

Este manual explica, de forma clara, cómo usar de manera segura y correcta el Sistema de Rehabilitación Motora Robótica. El sistema sirve para activar y controlar tres dispositivos de terapia: un guante robótico, una minibicicleta y una órtesis de codo. Funciona usando señales EEG que se captan con el Emotiv EPOC, y con eso se pueden manejar los actuadores con buena precisión para que la terapia sea más eficiente. Además, permite configurar sesiones personalizadas y apoya la rehabilitación de personas con movilidad reducida, ayudando a mejorar el movimiento tanto de brazos como de piernas gracias al uso de una interfaz cerebro-computadora (BCI).

## 1.1 Propósito del Dispositivo








El propósito de este dispositivo es ofrecer un sistema de rehabilitación motora robótica que ayude a que personas con movilidad reducida puedan recuperar mejor su función motora. Para eso, permite activar y usar tres equipos terapéuticos: un guante robótico, una minibicicleta de pedaleo asistido y una órtesis de codo.



## 1.2 Advertencias de Seguridad

Para garantizar la seguridad durante el uso del sistema:

- Utilice el sistema solo bajo la supervisión de profesionales capacitados y en un entorno controlado.
- Verifique las conexiones eléctricas antes de cada uso.
- No conecte ni desconecte dispositivos mientras el sistema esté encendido.
- Mantenga el botón de emergencia accesible en todo momento durante la sesión.
- No exponga el sistema a líquidos, humedad o temperaturas extremas.
- Asegúrese de que el equipo esté correctamente ensamblado y que los cables no interfieran en el movimiento del paciente.

## 2 Simbología Utilizada en el Sistema

| Imagen del símbolo                                                                  | Nombre                           | Descripción corta                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|
|    | <b>Alimentación</b>              | Conecta la fuente de energía al sistema.              |
|    | <b>Botón de Emergencia</b>       | Botón para detener el sistema en caso de emergencia.  |
|    | <b>Botón de Activación</b>       | Conecta el sistema a los actuadores.                  |
|   | <b>Guante Robótico Izquierdo</b> | Conexión al guante robótico del brazo izquierdo.      |
|  | <b>Guante Robótico Derecho</b>   | Conexión al guante robótico del brazo derecho.        |
|  | <b>Actuador</b>                  | Conexión de los actuadores auxiliares.                |
|  | <b>Sensor Analógico</b>          | Conexión a los sensores para la captación de señales. |
| <b>V<sub>in</sub></b>                                                               | <b>Voltaje de Entrada</b>        | Voltaje de entrada del sensor analógico.              |

| Imagen del símbolo                                                                | Nombre          | Descripción corta                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------|
|  | Órtesis de Codo | Conexión al actuador de la órtesis de codo.                   |
|  | Cable USB - B   | Conecta el ESP32 al computador para la comunicación de datos. |

### 3 Componentes del Sistema

El sistema consta de los siguientes componentes físicos:



- **Módulo Electrónico para control:** El hardware principal que gestiona todo el sistema.
- **Interfaz de rutina:** Software que se instala en la PC para gestionar las rutinas terapéuticas.
- **Dispositivos de terapia:** Incluye un guante robótico, una minibicicleta para realizar ejercicios de pedaleo y una órtesis de codo para realizar los movimientos de flexión y extensión.

- **Botón de emergencia:** Para detener el sistema en caso de emergencia.
- **Botón de activación:** Para activar los actuadores si el uso de un dispositivo externo.
- **Cable de alimentación:** Para la alimentación externa de todo el módulo.
- **Cable de datos tipo B:** Para la conexión del sistema.

## 4 Indicadores LED

Cada LED del sistema cumple una función específica. Los LEDs y su respectiva función son:



Imagen de los LEDs.

- **LED 1:** Estímulo visual.
- **LED 2:** Indicador de funcionamiento de la órtesis de codo.
- **LED 3:** Indicador de funcionamiento de la minibicicleta.
- **LED 4:** Indicador de funcionamiento del guante robótico izquierdo.
- **LED 5:** Indicador de funcionamiento del guante robótico derecho.
- **LED 6:** Indicador de funcionamiento del actuador.

## 5 Conectores del Sistema

A continuación se detallan los conectores del sistema y su respectiva función:



Conectores del sistema.

- **Conexión de Alimentación:** Conecta la fuente de energía al sistema.
- **Botón de Emergencia:** Detiene el sistema en caso de emergencia.
- **Botón de Activación:** Conecta el sistema a los actuadores.
- **Guante Robótico Izquierdo:** Conexión al guante robótico del brazo izquierdo.
- **Guante Robótico Derecho:** Conexión al guante robótico del brazo derecho.
- **Actuador:** Conexión de los actuadores auxiliares.
- **Sensor Analógico:** Conexión a los sensores para la captación de señales.
- **Órtesis de Codo:** Conexión al actuador de la órtesis de codo.
- **Cable USB-B:** Conecta el ESP32 al computador para la comunicación de datos.

## 6 Uso del Dispositivo

### 6.1 Configuración Inicial

- Conecte el módulo de control al cable de alimentación y asegúrese de que todos los dispositivos estén correctamente conectados.

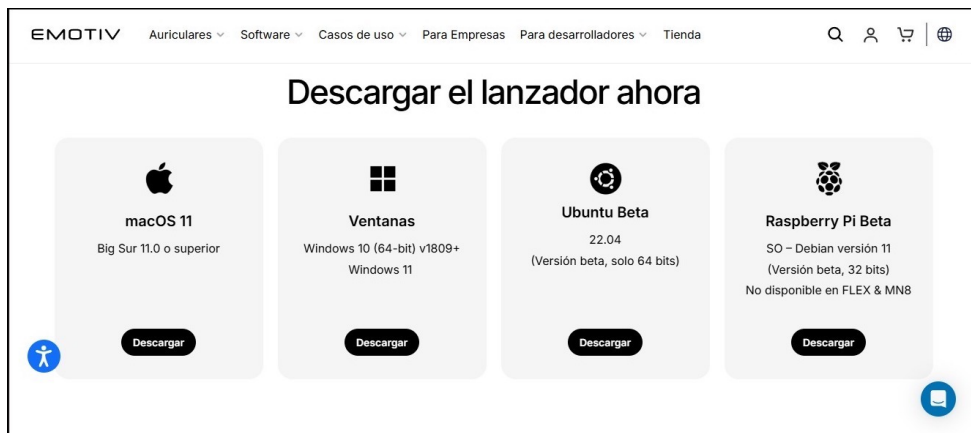
- Conecte el ESP32 a la computadora utilizando el cable USB para la comunicación serial de datos.
- Verifique que el sistema esté correctamente encendido y que los LEDs de estado estén funcionando como se describe en la sección de “Indicadores LED”.

⚠ **Advertencia:** No conecte ni desconecte el módulo mientras el sistema esté encendido.

## 6.2 Configuración del Emotiv Pro

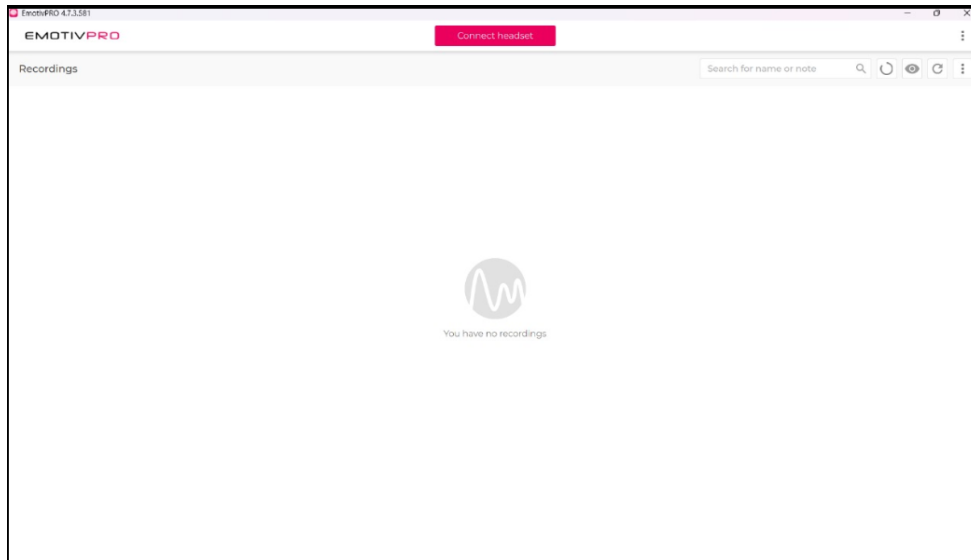
Antes de comenzar a controlar los actuadores, es necesario configurar el dispositivo Emotiv Pro para obtener las señales EEG. Aquí están los pasos a seguir:

- Descargue e instale el software Emotiv Pro desde la página oficial de Emotiv.



Descarga el software EMOTIV Launcher.

- Registre una cuenta en el portal de Emotiv y obtenga las credenciales necesarias para acceder a las funcionalidades.
- Conecte el dispositivo Emotiv EPOC a la computadora mediante el USB dongle.
- Verifique la calidad de la señal EEG a través de la interfaz de Emotiv Pro y asegúrese de que esté por encima del 80%.



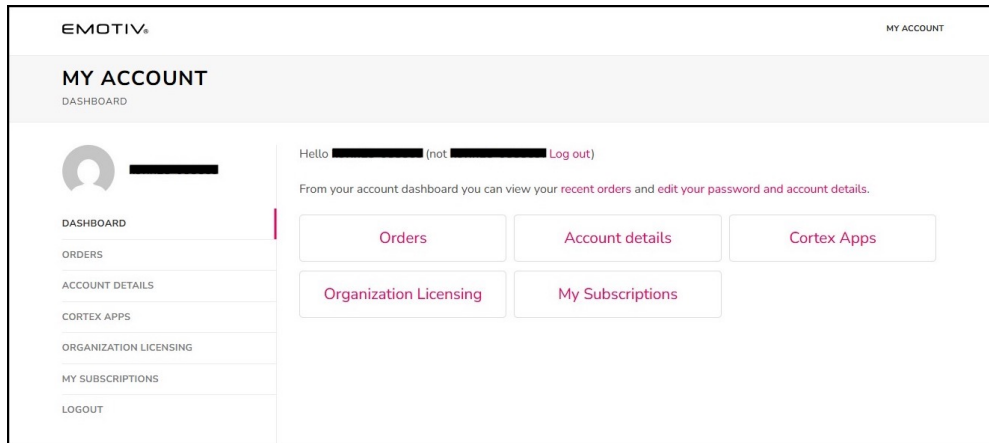
Configuración de Emotiv Pro.

## 6.3 Configuración del Software

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, debe configurar el software de control que se comunica con el dispositivo Emotiv EPOC utilizando la API Cortex.

### 6.3.1 Configuración de la API Cortex de Emotiv EPOC

- Descargue e instale la API Cortex desde la página oficial de Emotiv.
- Registre una cuenta en el portal de Emotiv y obtenga las credenciales necesarias para el uso de la API.
- Conecte el dispositivo Emotiv EPOC mediante el USB dongle a la computadora (ó Bluetooth).
- Verifique la calidad de la señal EEG a través de la interfaz del software y asegúrese de que la señal esté por encima del 80%.



Configuración de Cortex API.

**⚠ Advertencia:** En caso de no poder conectar el Cortex API a Python, puede ver el siguiente video: <https://www.youtube.com/watch?v=oKvhDe7tNts>

## 6.4 Programar Rutina Terapéutica

- Abra el software de programación de rutinas terapéuticas.
- Ingrese los datos del paciente (nombre, ID, etc.).
- Seleccione los dispositivos que desea activar: guante robótico, minibicicleta o órtesis de codo.
- Defina la duración de la sesión terapéutica (mínimo 1 minuto, máximo 20 minutos).
- Presione “Iniciar rutina” para comenzar la sesión de terapia.



Interfaz de rutina.

**⚠ Advertencia:** Una vez iniciada la rutina, si la computadora pierde comunicación con el módulo, se puede detener con el botón de emergencia física o con la que está programada en la pantalla del interfaz.

## 6.5 Monitoreo y Control de Sesiones

Durante la sesión, el software interactúa con el dispositivo Emotiv EPOC para recibir las señales EEG en tiempo real y controlar los actuadores de acuerdo con la intención del usuario, lo que permite un control preciso y eficiente de los dispositivos terapéuticos. Si la calidad de la señal es baja, el sistema notificará al operador y suspenderá la sesión hasta que se estabilicen las señales.

## 7 Mantenimiento

### 7.1 Mantenimiento General

El mantenimiento general del sistema incluye las siguientes tareas:

- Revise los cables y conectores del sistema antes de cada uso.
- Asegúrese de que el módulo de control, los dispositivos de terapia y el cableado estén bien conectados.
- Realice inspecciones periódicas del equipo para detectar cualquier daño visible o mal funcionamiento.

## 7.2 Limpieza del Sistema

Para conservar el equipo en buen estado y evitar fallas por polvo o suciedad, realice la limpieza siempre con el sistema apagado y desconectado.

### 7.2.1 Recomendaciones de Limpieza:

- Limpie la carcasa del módulo y los dispositivos con un **pañó de microfibrá seco** o ligeramente humedecido.
- Para retirar polvo de ranuras o conectores, use **aire a baja presión** (sin aplicar directamente por mucho tiempo en un solo punto).
- Si necesita desinfectar superficies externas, aplique una **pequeña cantidad de alcohol isopropílico (70%)** en el paño (nunca directamente sobre el equipo).
- Evite que ingrese líquido a los conectores, botones o a la carcasa.

#### No usar:

- Cloro, amoníaco, limpiadores abrasivos o esponjas ásperas.
- Rocío directo (spray) sobre el módulo o dispositivos.

#### Frecuencia sugerida:

- Limpieza externa rápida: **después de cada sesión**.
- Limpieza de polvo en ranuras/carcasa: **semanal** (según el uso y el ambiente).

## 7.3 Alimentación Eléctrica

Para mantener el sistema funcionando correctamente:

- Verifique la conexión de alimentación antes de cada uso.
- Asegúrese de que el sistema esté correctamente conectado a una fuente de energía estable.
- Realice pruebas periódicas de la fuente de alimentación para evitar cortes inesperados.

## 7.4 Mantenimiento del Sistema Electrónico

El sistema electrónico debe ser revisado periódicamente para asegurar su correcto funcionamiento:

- Verifique que los LEDs funcionen correctamente durante la operación.
- Asegúrese de que los sensores analógicos y los actuadores estén conectados de manera estable.
- Mantenga el módulo de control libre de polvo o residuos que puedan interferir con la comunicación.

## 7.5 Mantenimiento por Dispositivo

A continuación se detallan las tareas de mantenimiento recomendadas para cada dispositivo del sistema:

| Componente          | Tarea Principal                                                      | Frecuencia        |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Módulo de Control   | Verificar la conexión de cables y funcionamiento de LEDs             | Antes de cada uso |
| Guante Robótico     | Revisar el estado de los cables y los sensores de flexión            | Cada 2 semanas    |
| Minibicicleta       | Comprobar que los pedales y el motor estén funcionando correctamente | Cada 3 meses      |
| Órtesis de Codo     | Verificar la movilidad y ajuste de la órtesis                        | Cada mes          |
| Botón de Activación | Asegurarse de que el botón funcione correctamente                    | Cada 2 meses      |
| Botón de Emergencia | Comprobar que el botón se activa correctamente en caso de emergencia | Antes de cada uso |

**⚠ Advertencia:** Todo procedimiento de mantenimiento debe realizarse con el sistema apagado y desconectado de la fuente de alimentación.

## 8 Solución de Problemas

A continuación se presenta una tabla con los posibles problemas que pueden ocurrir durante el uso del sistema, sus posibles causas y las soluciones sugeridas:

| <b>Problema</b>                     | <b>Causa posible</b>                                            | <b>Solución sugerida</b>                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| El sistema no enciende              | Fuente de alimentación desconectada                             | Verifique que el cable de alimentación esté correctamente conectado al módulo de control y a la fuente de energía.                                                                  |
| No se conecta al dispositivo        | Problema con el cable USB                                       | Asegúrese de que el cable USB esté bien conectado entre el ESP32 y la computadora. Revise el estado del cable y sustitúyalo si es necesario.                                        |
| No hay comunicación con el módulo   | Conexión incorrecta de los cables o desconexión de los sensores | Verifique todas las conexiones de los cables, especialmente los que conectan el módulo de control con los actuadores, sensores y el computador.                                     |
| Los LEDs no funcionan correctamente | Fallo en la alimentación o el módulo de control                 | Compruebe si la fuente de alimentación está funcionando correctamente y si el módulo de control está encendido. Verifique también los LEDs para asegurarse de que no estén dañados. |
| El guante robótico no responde      | Desajuste en la conexión del sensor o actuador                  | Revise que el sensor de flexión y los cables del guante robótico estén conectados correctamente al módulo de control.<br>Realice pruebas de calibración en el guante.               |

| <b>Problema</b>                                              | <b>Causa posible</b>                                    | <b>Solución sugerida</b>                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| La minibicicleta no funciona                                 | Desconexión de los actuadores o cables del motor        | Asegúrese de que los cables estén bien conectados al sistema y que el actuador de la minibicicleta esté funcionando correctamente. Realice pruebas de activación del actuador. |
| La órtesis de codo no responde                               | Conexión defectuosa o fallo en el actuador              | Verifique la conexión del actuador al sistema y asegúrese de que esté funcionando. Realice pruebas de activación de la órtesis.                                                |
| La comunicación entre el software y el dispositivo se pierde | Problemas con la conexión USB o software no configurado | Verifique la conexión USB entre el ESP32 y la computadora. Asegúrese de que el software esté correctamente configurado y la comunicación esté estable.                         |

# 9 Diagrama de Conexiones

