



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOG"

MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

PROYECTO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGÍSTER

Título del proyecto:
Implementación de una Prótesis de Articulaciones Interfalángicas Controladas Mediante Interfaz BCI
Línea de Investigación:
Automatización y control de procesos con aplicaciones en la industria
Campo amplio de conocimiento:
Ingeniería, Industria y Construcción
Autor/a:
José Alberto Navarrete Andino
Tutor/a:
Mgs. René Ernesto Cortijo Leyva

Quito – Ecuador

2023

APROBACIÓN DEL TUTOR



Yo, **Rene Ernesto Cortijo Leyva** con C.I: **1719010108** en mi calidad de Tutor del proyecto de investigación titulado: **Implementación de una Prótesis de Articulaciones Interfalángicas Controladas Mediante Interfaz BCI,**

Elaborado por: **José Alberto Navarrete Andino**, de C.I: **0401328588**, estudiante de la Maestría: **ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**, resolución: **RPC-SO-09-No.265-2021**, de la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, lo apruebo en todas sus partes.

Quito D.M., 5 de septiembre del 2023

RENE
ERNEST
O
CORTIJO
LEYVA

Firmado digitalmente por RENE ERNESTO CORTIJO LEYVA
Fecha: 2023.09.05 20:57:20 -05'00'

Firma

DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE



Yo, Navarrete Andino José Alberto con C.I: 0401328588, autor del proyecto de titulación denominado: Implementación de una Prótesis de Articulaciones Interfalángicas Controladas Mediante Interfaz BCI. Previo a la obtención del título de Magister en Electrónica y Automatización.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar el respectivo trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica Israel los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor del trabajo de titulación, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital como parte del acervo bibliográfico de la Universidad Tecnológica Israel.
3. Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de prosperidad intelectual vigentes.

Quito D.M., 05 de septiembre de 2023



Firmado electrónicamente por:
JOSE ALBERTO
NAVARRETE ANDINO

Firma

Tabla de contenidos

APROBACIÓN DEL TUTOR	2
DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE	3
INFORMACIÓN GENERAL	1
Contextualización del tema	1
Problema de investigación	3
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:	4
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	6
1.1. Contextualización general del estado del arte	6
1.2. Proceso investigativo metodológico	8
CAPÍTULO II: PROPUESTA	9
2.1. Fundamentos teóricos aplicados	9
Sistema Nervioso	9
Fisiología del cerebro	9
Electroencefalograma	10
Sistema Internacional 10-20	10
Ritmos Cerebrales	11
Sistemas BCI	11
Tipos de BCI	12
Impresión 3D	12
Emotiv Epoc X	12
Controlador ESP8266	15
Emotiv BCI	15
Plataforma Node-Red	15
Emotiv -BCI Node-RED Toolbox	16
Protocolo MQTT	16
Broker MQTT	17
2.2 Descripción de la propuesta	17
a. Estructura general	17
b. 18	
Prótesis impresa en 3D	19
Entrenamiento de comandos null y push del sensor Emotiv Epoc X	24

Instalación y ejecución de Node-RED	30
Implementación del programa en el ESP8266 y Arduino nano mediante el programa de Arduino IDE	31
Broker Mosquito o corredor MQTT	34
Implementación del programa en Node-RED	36
Esquema de la Placa Electrónica	40
c.45	
2.3 Validación de la propuesta	44
2.4 Matriz de articulación de la propuesta	48
2.5 Análisis de resultados. Presentación y discusión.	50
CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS	57

Índice de tablas

Tabla 1	11
Nomenclatura Sistema 10/20	11
Tabla 2	13
Listado de especificaciones técnicas de la diadema EPOC X	13

Índice de figuras

Figura 1	13
Diadema giratoria EPOC X de 14 canales	13
Figura 2.	15
Chip wifi ESP8266-12E	15
Figura 3.	16
Biblioteca de Nodos personalizados del programa Emotiv-BCI	16
Figura 4	18
Organigrama del desarrollo del proyecto	18
Figura 5	19
Impresora Artillery X1	19
Figura 6	20
Piezas que componen el dedo pulgar de la prótesis	20
Figura 7	21
Prótesis de articulaciones en 3D en programa Fusión 360	21
Figura 8	22
Prótesis de articulaciones interfalángicas listas para impresión 3D	22
Figura 9	23
Piezas que componen el dedo índice de la prótesis	23
Figura 10	23
Prótesis impresa en impresora de fundición de filamento y completamente armada	23
Figura 11	24
Programa EmotivLauncher	24
Figura 12	25
Menú de dispositivos para ser usados	25
Figura 13.	26
Menú para seleccionar perfiles de entrenamiento	26
Figura 14.	27
Cubo de entrenamiento para comandos mentales	27
Figura 15.	28
Ubicación de sensores para la diadema Epoc X usando el sistema internacional 10-20	28
Figura 16.	29
Estado de los sensores electroencefalograma (EEG)	29
Figura 17.	29
Diagrama cerebral con diferentes estados de entrenamiento	29

Figura 18	30
Salida del comando npm install -g --unsafe-perm node-red	30
Figura 19.	31
Programa en el software Ide de Arduino	31
Figura 20.	33
Programa para mover el dedo pulgar en el software Ide de Arduino	33
Figura 21.	33
Dedo pulgar en posición de aducción	33
Figura 22.	34
Dedo pulgar en posición de abducción	34
Figura 23.	35
Programa Mosquitto instalado en la computadora de prueba	35
Figura 24.	35
Broker Mosquitto corriendo	35
Figura 25.	36
Cortex apps	36
Figura 26.	37
Barra lateral de depuración	37
Figura 27.	37
Nodo de inicialización MOTIV	37
Figura 28.	38
Nodo de comando mental Push	38
Figura 29.	38
Editor de Nodo de comando mental escogiendo el comando Push	38
Figura 30.	39
Nodo de entrada Mqtt	39
Figura 31.	39
Configuración del Nodo de entrada Mqtt	39
Figura 32.	39
Configuración del Nodo de salida Mqtt	39
Figura 33.	41
Esquema del circuito de la prótesis	41
Figura 34.	41
PCB del esquema para el accionamiento de la prótesis	41
Figura 35.	42
PCB cara superior con componentes electrónicos	42

Figura 36.	42
PCB cara inferior	42
Figura 37.	43
Prótesis completa con PCB	43
Figura 38.	43
Prótesis completa con PCB	43
Figura 39.	50
Electroencefalograma (EEG) registrado con el comando mental entrenado al momento de la acción de agarre	50
Figura 40.	51
Electroencefalograma (EEG) registrado en el segundo intento de agarre	51
Figura 41.	51
Registro de potencia de ondas cerebrales	51
Figura 42.	52
Electroencefalograma (EEG) registrado en el tercer intento de agarre	52
Figura 43.	52
Registro de potencia de ondas cerebrales	52

INFORMACIÓN GENERAL

Contextualización del tema

El término amputación hace referencia a la pérdida parcial o total de una extremidad en el ser vivo, generalmente es una afectación irreparable que causa en quien la sufre daños no sólo a nivel físico sino también mental (Chen, 2013). Es una problemática que en muchas ocasiones pasa desapercibida por la población en general, pero que en realidad es un tema delicado sobre todo en la sociedad actual donde nos inundan las redes sociales y la imagen se ha convertido en lo más importante.

Las amputaciones de los dedos de las manos ya sean parciales o totales son lesiones frecuentes en el miembro superior. La pérdida de uno o varios dedos en el individuo o de la mano completa le va a ocasionar incapacidad, pérdida de movilidad, disminución de la fuerza muscular para realizar funciones de precisión como son el agarre y pinza, limitación al realizar actividades de la vida diaria, secuelas a nivel psicológico ya sea por su imagen incompleta o porque sufren cambios de readaptación en sus puestos de trabajo; y también es importante mencionar los gastos de salud que genera esta situación (Burger, 2009) (Galán & Vergara, 2019)

La mayoría de lesiones traumáticas de la mano que conllevan una amputación se producen en lugar de trabajo ya sea por la utilización incorrecta de maquinaria o porque los equipos de trabajo se encuentran en mal estado o ya cumplieron con su vida útil (Lamande, 2014). En Estados Unidos se registran cerca de 2 millones de trabajadores incapacitados anualmente, de los cuales alrededor de 400 000 sufrieron lesiones en sus manos, siendo amputación de articulaciones interfalángicas las más recurrentes con 72% (López & Estrada, 2009). Es importante mencionar que de las cifras que registra el país norteamericano el 60% de amputaciones de mano ocurrieron en el sector metalúrgico. En Ecuador el 45,66% de la población presenta algún tipo de discapacidad física. La mayoría de las amputaciones que se registran en nuestro país se deben a accidentes en el trabajo, accidentes de tránsito, quemaduras, secuelas de patologías como diabetes, osteomielitis o cáncer (Discapacidades, 2021). Específicamente en la ciudad de Tulcán se registraron tres casos por amputación de dedos de la mano en el año 2021, dos por accidente laboral y uno secundario a una enfermedad, mientras que en el año 2020 se registraron dos casos de igual forma por accidente laboral.

La mano tiene una enorme variedad de posiciones, movimientos y acciones, lo que la hace extremadamente rica desde el punto de vista funcional. Su grado de perfección es particularmente notable en el hombre, por ejemplo, la oposición del pulgar es un movimiento que no puede ser realizado por otro mamífero. La mano es a la vez un órgano de ejecución y un receptor sensorial de gran precisión y sensibilidad, que nos permite comprender el mundo en relieve a la vez que sirve de herramienta para el desarrollo del cerebro. De esta manera se forma un par funcional indisociable como mano-cerebro (Donoso, 2007)

El tratamiento fisioterapéutico de lesiones traumáticas se lleva a cabo en centros de rehabilitación especializados con profesionales que aplican equipos y realizan ejercicios específicos para mejorar la apariencia del muñón o remanencia, y fuerza muscular; más no se logra rehabilitar la estética idónea que el usuario anhela. El paciente que acude a rehabilitación debe acudir de manera continua a sesiones de tratamiento, lo que implica gastos económicos, abandonos de tratamientos, generando un problema social (Sánchez, 2018)

Una de las opciones que se convierten en viables para los pacientes que han perdido los dedos de su mano o su mano en la totalidad, es la adaptación de una prótesis impresa en 3D de código abierto, y que mediante un controlador reciba señales electroencefalográficas, que logren la funcionalidad activa de la mano y la satisfacción psicológica en el individuo (Cardona, 2011). La Organización Mundial de la Salud señala que el 95% de los 40 millones de amputados de países en desarrollo no tienen acceso o no pueden adquirir una prótesis debido a sus condiciones socioeconómicas y por el elevado costo que implica su fabricación; y las pocas prótesis que son adquiridas son de tipo anti ergonómico y que solo presentan cierto grado de funcionalidad (Salud, 2010)

La impresión 3D al utilizar capas delgadas de plástico permite modelar un diseño de prótesis adaptable a las necesidades de cada individuo que le permitan cumplir con las funciones de agarre y pinzamiento que permitan realizar actividades de motricidad fina y gruesa, además de lograr arcos articulares completos en las articulaciones interfalángicas (Arias, 2012)

Para el empleo de las prótesis se usa frecuentemente señales mioeléctricas en este caso se reemplazan por señales encefalográficas captadas por un casco de bajo costo que cuenta con catorce electrodos no invasivos por el tipo de afectación de los miembros superiores en este caso por el nivel de amputación o cuando el muñón es muy corto (Correa & Vivas, 2016).

Las señales serán procesadas mediante un controlador que reacciona de acuerdo al entrenamiento de los movimientos de las partes afectadas, mejorando las habilidades motoras.

La implantación de esta prótesis con el uso de señales encefalográficas permiten su manipulación de mejor manera en afectaciones más delicadas. El desarrollo de este prototipo permitirá tener otra alternativa al usuario final con respecto al uso de la prótesis tradicionales y prótesis robotizadas, que su adquisición se limita por el alto costo y por la no existencia de centros ortopédicos que tengan esta tecnología a nivel local y más bien se las obtienen en países desarrollados.

La impresión 3D además del modelado del prototipo de la prótesis, mejora los tiempos de construcción, y se puede efectuar diferentes pruebas de materiales como el ABS, PETG, Nylon obteniendo diferentes resultados en pruebas de esfuerzo dependiendo del material en el que será elaborado el prototipo.

Culminando con este problema, el campo con respecto a la innovación tecnológica en cuanto al diseño de prótesis en impresión 3D que sean controladas por señales electroencefalográficas es escaso, por lo que la elaboración de un prototipo de prótesis se convierte en una opción rápida, natural y de bajo costo para quienes sufrieron una amputación.

Problema de investigación

Entre los varios problemas sociales que tiene nuestro país que incluso puede ser visto día a día, está la presencia de un elevado número de personas con amputaciones inferiores o superiores. Sin embargo, quienes tienen amputación de miembros superiores no utilizan ninguna prótesis.

El problema es que el uso de una prótesis en un miembro superior el paciente no lo considera sólo como un asunto de estética sino como un solo elemento funcional.

Pero para que una prótesis sobre todo de la mano sea funcional la humanidad lo ha estado intentándolo desde que se tiene memoria, incluso llegando hasta la fantasía, como lo demuestran una serie de películas en que a las prótesis se les asigna hasta poderes mágicos.

Por otro lado, si bien es cierto que hasta la fecha se han hecho grandes avances científicos, no son suficientes para que los pacientes tengan un fácil acceso por su alto precio y los artefactos que son accesibles no pueden cumplir con las expectativas, necesidades y estética de los pacientes

Por otro lado, el diseño antiestético de las prótesis, la falta de funcionalidad que éstas ofrecen y su elevado costo al momento de adquirirlas, se convierten en un problema para las personas que sufrieron la amputación traumática de sus dedos o de un miembro superior completo.

Sin embargo, se hace necesario seguir investigando, seguir experimentando para conseguir una prótesis que aparte de ser estética sea funcional y que les permita a las personas que tienen esa dificultad puedan no solo psicológicamente sino operacionalmente desempeñarse en una forma normal y autosuficiente.

De ahí la importancia de implementar un prototipo de prótesis elaborada en impresión 3D y controlada mediante señales electroencefalográficas que cumplan con las expectativas de un individuo que acude a rehabilitación de manera constante.

Objetivo general

Desarrollar una prótesis de articulaciones interfalángicas controladas mediante interfaz BCI

Objetivos específicos

- Desarrollar un prototipo de una prótesis de una mano con sus respectivas articulaciones interfalángicas mediante el proceso de modelado por deposición fundida FDM realizado en una impresora 3D
- Realizar la interfaz de comunicación entre el dispositivo Emotiv Epoc X y la prótesis que contendrá servomotores y una placa electrónica para su control.
- Entrenar los movimientos neutral y push en el software Emotiv BCI para interactuar con la prótesis fabricada.
- Realizar pruebas de agarre y extensión de la prótesis de articulaciones interfalángicas

Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:

Los sistemas BCI basados en EEG siguen siendo una tendencia bastante nueva, especialmente en los campos médicos.

Se ha presentado una estructura e implementación de un sistema de prótesis de mano controlado por la mente a través de una interfaz BCI. La prótesis de mano está hecha de materiales resistentes y ligeros en nuestro caso se construyó de material PLA. El prototipo contiene tres servomotores controlados por una placa con conexión WiFi para realizar acciones de agarre y extensión.

Es una opción para abaratar costos, ya que la mayoría de prótesis tienen elevados costos, y la implementación con tecnología de vanguardia como la impresión 3D es frecuentemente utilizada hoy en día en aplicaciones médicas como se mencionó anteriormente.

Este desarrollo de prótesis ayudaría a desarrollar prótesis a medida con mejores acabados proyectándose a la estética de la persona y asemejándose más a la forma y los movimientos de un miembro superior real.

Se implementará y probará este prototipo en el área de Fisioterapia del Hospital Luis Gabriel Dávila de Tulcán con una persona que ha ejecutado el entrenamiento durante un día mediante los comandos neutral y push en el programa EMOTIV BCI para realizar la acción de agarre y extensión, en presencia de miembros del área de Rehabilitación y Fisioterapia para impartir una opción a personas que tienen miembros amputados, usando mejores tecnologías como las tradicionales que mejorará la calidad de vida de la persona afectada en sus actividades diarias. Al ser un prototipo el uso de diferentes tipos de tecnologías tanto para la fabricación como para el control permitirá tener una opción adicional para el desarrollo de prótesis con mejores características de funcionalidad, mejores características estéticas y de ergonomía, reemplazo de materiales tradicionales para su elaboración, tiempo de elaboración más reducidos.

En la actualidad existe un gran porcentaje de personas que tienen alguna deficiencia motora en las extremidades superiores, especialmente en las articulaciones interfalángicas que son amputadas sin dejar un muñón el cual ayuda en la funcionalidad de las prótesis tradicionales, al no tener el muñón es necesario optar por una prótesis 3D que sea controlada por una interfaz BCI. Por tanto, la implementación de una prótesis mediante impresión 3D y control mediante señales encefalográficas a través de una interfaz BCI, facilitará en gran medida la réplica de la funcionalidad y correspondencia del miembro perdido.

Los resultados de la investigación se los va a socializar mediante una presentación en el Hospital Luis Gabriel Dávila en el área de Rehabilitación de la ciudad de Tulcán, verificando la funcionalidad y practicidad para diferentes objetos en la acción de agarre y extensión de la prótesis de articulaciones interfalángicas controladas mediante interfaz BCI, los resultados obtenidos nos darán una opción para elaborar una prótesis para personas de bajos recursos que se adapte a las necesidades y vean como una opción usar una prótesis con estas características y mejorar en cierta medida la calidad de vida en sus actividades diarias.

CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. Contextualización general del estado del arte

El uso de señales de ondas cerebrales para controlar prótesis que reemplazan a miembros superiores se obtiene en la literatura para diferentes aplicaciones las mismas que han ayudado en el desarrollo del trabajo de investigación, ya sea artículos científicos como trabajos de titulación han permitido encaminar en el desarrollo de una prótesis de articulaciones interfalángicas controladas mediante interfaz BCI, de los cuales podemos mencionar las siguientes:

Un estudio realizado en la Universidad Tecnológica Israel, en la tesis para obtener el Título de Ingeniero en Electrónica Digital y Telecomunicaciones con el tema de “Desarrollo de una silla de ruedas controlado por ondas cerebrales usando el dispositivo Neurosky Mindwave mobile 2”

Usa una silla de ruedas eléctrica la cual es controlada mediante ondas cerebrales para que personas con alguna discapacidad puedan moverse sin la necesidad de que otra persona la movilice, este tipo de sillas de ruedas controladas por un HMI, es importante al aumentar la interrelación de la persona con cierta discapacidad con su medio, Se obtuvo como resultados que la interfaz creada funciona perfectamente pero para activar el sistema las personas que usan el dispositivo Neurosky deben tener un grado de concentración alto para poder ejecutar los movimientos que se requiere en la silla de ruedas (Toapanta, 2018)

El estudio realizado con el tema “Una prótesis BCI basada en EEG de bajo costo que utiliza imágenes motoras” presentó un procedimiento para controlar una prótesis de mano impresa en 3D con cinco grados de libertad basada en el uso de auriculares EMOTIV EPOC+ EEG para detectar actividad cerebral y Arduino Uno como microcontrolador. También propusieron dos alternativas de software para controlar la prótesis de mano. (Elstob & Secco, 20016)

En la conferencia internacional IEEE sobre tecnologías emergentes y prácticas comerciales innovadoras para la transformación de las sociedades han presentado una prótesis de brazo inteligente impresa en 3D controlada a través de señales de EEG cerebrales obtenidas mediante el uso de un auricular EMOTIV EPOC. Se han equipado sensores y actuadores inteligentes en el brazo para brindarle a la persona amputada una retroalimentación inteligente con respecto al entorno circundante. Se utilizaron Raspberry Pi III y Arduino Mega para controlar el brazo protésico. (Beyrouthy y otros, 2016)

En la conferencia sobre avances en el procesamiento de señales han expuesto el desarrollo de una prótesis de brazo EEG controlada por el cerebro de bajo costo utilizando un auricular Neurosky Mindwave. El brazo protésico tiene dos movimientos principales de los dedos: flexión y extensión. La placa de microcontrolador Arduino Uno se ha utilizado para controlar estos movimientos a través de señal de comando generadas según el valor de las ondas cerebrales recibidas accionando varios servomotores que realizan el movimiento individual de cada dedo . (Bright y otros, 2016)

En el simposio internacional sobre informática, consumo y control con el tema "Control de prótesis de brazo por el cerebro humano" han utilizado Arduino Uno como microcontrolador y EMOTIV EPOC como un auricular EEG para controlar el brazo protésico a través de comandos cerebrales. El brazo protésico es un brazo impreso en 3D de bajo costo que contiene sensores y actuadores inteligentes para brindarle al amputado del brazo retroalimentación sobre el entorno que lo rodea. El brazo protésico tiene seis movimientos que son el movimiento de cada dedo individualmente y cerrar todos los dedos. (Chinbat & Lin, 2018)

Los autores del artículo con el tema "Un red wizard enfocada para un control protésico robótico basado en BCI" han propuesto un enfoque novedoso para controlar los movimientos de apertura y cierre de una prótesis de mano. Utilizaron un Arduino Uno como microcontrolador y un auricular EMOTIV EPOC+ para registrar las ondas cerebrales. También propusieron un "clasificador basado en redes neuronales sin peso" para la clasificación supervisada. Los resultados experimentales mostraron que es adecuado utilizar "WiSARD-Classifer" como modelo de referencia para la clasificación de señales EEG. (Staffa y otros, 2020)

Más recientemente, Parth Limbani ha desarrollado una prótesis de brazo controlada por ondas cerebrales. Utilizaron un sensor móvil de ondas mentales NeuroSky para obtener las señales de EEG. Se ha utilizado una plataforma de software de ambiente abierto para el procesamiento y clasificación de señales. El script de Python se ha utilizado para enviar datos desde open-vibe al microcontrolador Arduino para controlar el brazo protésico. Utilizaron un brazo impreso en 3D hecho de material PLA con un peso total de unos 300 g sin motores (Parth y otros, 2020)

El estudio desarrollado con el tema "Mano protésica de interfaz cerebro-computadora basada en EEG usando frambuesa pi 4" se desarrolla un brazo protésico impreso en 3D de bajo costo comandado a través de comandos cerebrales utilizando tecnología BCI basada en EEG. Este

sistema se conforma de un motor paso a paso el mismo que es controlado por Raspberry Pi 4 para ejecutar diferentes acciones como la apertura y sujeción de objetos (Ali y otros, 2021)

1.2. Proceso investigativo metodológico

El trabajo presentado es una investigación cuantitativa ya que tiene como propósito diseñar un prototipo de prótesis en personas sometidas a una amputación de dedos de la mano, se observarán diferentes fenómenos que se den en su entorno natural, para después analizarlos. Y según la variable tiempo es un estudio transversal; ya que se analizará la funcionalidad y adaptabilidad de la prótesis a diseñar.

Tipo de Investigación:

Descriptivo: el presente estudio es de carácter descriptivo ya que permite analizar y entender con detalle la problemática que genera una amputación en el individuo y su adaptación a la sociedad.

Documental: se revisarán, analizarán y sistematizarán documentos y archivos referentes al presente tema de investigación.

Experimental: se determinará el efecto posterior en un amputado al diseñar un prototipo de prótesis que se adapte a sus necesidades.

Métodos, técnicas e instrumentos:

La técnica de recolección de datos es una de las tantas maneras o formas para obtener información de carácter formal, empleando procesos de forma sistematizada en el registro de observaciones y datos para analizar un fenómeno con la mayor objetividad posible. En el presente estudio se tomará en cuenta en primer lugar la Observación, para obtener una apreciación y análisis real de los problemas que acarrea al ser humano una amputación

En este estudio la observación a realizar será de tipo no estructurada y participante, no estructurada por ser un medio rápido que permite captar la realidad sin necesidad de utilizar elementos especiales técnicos; y participante porque el investigador y los investigados intervendrán de forma activa y directa en todo el proceso de la investigación.

Las herramientas que utilizamos para recoger y almacenar datos se denominan instrumentos de recolección de datos; en este caso aplicaremos mediciones y el control de señales al momento de diseñar el prototipo.

La investigación actual se probará en la ciudad de Tulcán, en el Área de Fisioterapia del Hospital Luis Gabriel Dávila, donde se validará con personal propio del área el funcionamiento

de agarre y extensión de la prótesis , y en la Universidad Tecnológica Israel, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Master en Electrónica y Automatización.

CAPÍTULO II: PROPUESTA

2.1. Fundamentos teóricos aplicados

Sistema Nervioso

Las neuronas del sistema nervioso producen y conducen señales electroquímicas, mientras que las células de sostén ayudan a las neuronas a realizar sus tareas. Para clasificar las neuronas se utilizan categorías funcionales y morfológicas, y los distintos tipos de células de sostén realizan tareas específicas.

El sistema nervioso central (SNC), formado por el encéfalo y la médula espinal, y el sistema nervioso periférico (SNP), formado por los nervios craneales que salen del encéfalo y los nervios espinales que salen de la médula espinal, son las dos divisiones del sistema nervioso.

Sólo las neuronas y las células de sostén constituyen la mayoría de las células del sistema nervioso. Los componentes estructurales y operativos fundamentales del sistema nervioso se denominan neuronas. Las neuronas están diseñadas específicamente para responder a entradas químicas y físicas, llevar a cabo impulsos electroquímicos y liberar reguladores químicos. La percepción de estímulos sensoriales, el aprendizaje, la memoria y el control de músculos y glándulas son posibles gracias a estos procesos. Aunque muchas neuronas pueden reparar una sección cortada o emitir pequeñas ramas nuevas en determinadas circunstancias, casi ninguna neurona puede dividirse por mitosis. Fox, S. (2017)

Fisiología del cerebro

En el centro del sistema nervioso, el encéfalo, o cerebro, es capaz de llevar a cabo tareas extremadamente complicadas que son necesarias para la supervivencia

Los cerebros humanos adultos suelen pesar 1,5 kg y medir unos 1130 cm³ en las mujeres y 1260 cm³ en los hombres. Se alojan en el interior del cráneo. La corteza cerebral es de color beige rosado y ligeramente blanca en su interior, a pesar de que se la denomina "materia gris" y tiene una textura muy delicada. El encéfalo recibe su nombre distintivo de las neuronas, o células nerviosas, que componen el cerebro. Juntas, estas neuronas forman una sustancia gris.

Podemos distinguir entre los hemisferios izquierdo y derecho del cerebro. Representan el 85% del peso de todo el cerebro. El cuerpo calloso, un importante haz de fibras de células nerviosas, conecta los miles de millones de neuronas de ambos hemisferios. En la actualidad, los científicos creen que la principal distinción entre el trabajo que realiza cada hemisferio y cómo lo lleva a cabo es la forma en que procesan la información.

Electroencefalograma

El electroencefalograma (EEG) es un método bastante antiguo para examinar funcionalmente el sistema nervioso central (SNC), pero sigue siendo útil hoy en día para realizar diagnósticos clínicos y hacer un seguimiento de trastornos específicos. Junto con otras técnicas neurofisiológicas, funciona como una herramienta diagnóstica con una amplia gama de aplicaciones, entre las que se incluyen el estudio y diagnóstico de la patología del sueño, la monitorización intraoperatoria y los potenciales evocados somatosensoriales. (Ramos-Argüelles y otros, 2009)

La palabra "electroencefalograma", a veces conocida como EEG, fue utilizada por primera vez por Hans Berger en 1929 para referirse al registro de los cambios eléctricos del cerebro que permiten los electrodos colocados en el cuero cabelludo.

Sistema Internacional 10-20

El sistema internacional 10/20 es un método internacionalmente reconocido que permite estandarizar la colocación de los electrodos utilizando referencias craneanas; el número 10 y 20 hacen referencia a que los electrodos se colocan espaciados en un 10 y 20 % entre sí y en relación con determinadas referencias craneanas. Suele variar de una persona a otra de acuerdo con el tamaño del cráneo, pero las proporciones antes mencionadas no varían.

Este enfoque ha permitido normalizar la terminología utilizada en todo el mundo y la colocación de los electrodos en el cráneo. También ha facilitado el análisis de las señales y la cobertura de la superficie craneal. (López G. , 2017)

El sistema 10/20 maneja una nomenclatura que se describe en la siguiente tabla; a cada lóbulo se le asigna una letra para su identificación, mientras a los hemisferios se les representa mediante números.

Tabla 1

Nomenclatura Sistema 10/20

ELECTRODO	LÓBULO	HEMISFERIO	NÚMEROS
F	Frontal		Pares
T	Temporal	Derecho	2,4,6,8
C	Central		
P	Parietal		Impares
O	Occipital	Izquierdo	1,3,5,7
AF	Frontal-Anterior		

Ritmos cerebrales

Cuando se habla de las fluctuaciones rítmicas de los potenciales postsinápticos de un grupo neuronal, se hace referencia a la oscilación o actividad oscilatoria como ritmos cerebrales. También puede utilizarse para definir el patrón rítmico de la descarga del potencial de acción de una neurona o grupo neuronal. Al realizar una acción motora, una tarea cognitiva o una tarea perceptiva, la actividad oscilatoria promueve la sincronización entre grupos neuronales de la misma área cortical o de áreas distantes distintas. Asociar la actividad oscilatoria con los eventos de sincronización puede resultar confuso ya que, a pesar de estar conectados, no son lo mismo.

La actividad oscilatoria es un componente fundamental del funcionamiento del cerebro. En varios niveles del cerebro, la actividad oscilatoria interviene en funciones perceptivas, cognitivas y motoras. (Artieda, 2012)

Sistemas BCI

Los sistemas BCI (interfaz cerebro-ordenador), a menudo denominados sistemas de interfaz cerebro-ordenador, se crean combinando hardware y software para convertir la actividad eléctrica del cerebro en órdenes de control de objetos del mundo real.

Tipos de BCI

Dado que la fase de clasificación vincula el propósito del usuario a partir de técnicas de señales de control para ordenar una acción concreta, se considera el paso más trascendental de un sistema BCI. La eficacia de un sistema BCI viene determinada por su precisión de clasificación, que se basa en la proporción entre el número de ensayos categorizados correctamente (intentos con éxito de ejecutar las tareas mentales necesarias) y el número total de ensayos realizados, según (Graimann et al., 2009).

La proporción de ensayos identificados incorrectamente respecto al total de ensayos también puede utilizarse para calcular el error. Para los procedimientos de clasificación de señales, actualmente se emplean varios métodos de clasificación, entre ellos: análisis discriminante lineal (LDA), máquinas de vectores de soporte (SVM), clasificador bayesiano, árbol de decisión, redes neuronales artificiales, k vecinos más cercanos (kNN), etc.

Impresión 3D

Haciendo referencia a la historia es importante mencionar que, la estereolitografía, término utilizado para describir el proceso de impresión, fue creada inicialmente por Charles Hull. Se centra en el desarrollo de prototipos y la construcción de maquetas. Las cosas tridimensionales fueron posibles gracias a Scott Crump y su empresa, y con el tiempo, la técnica ayudó al crecimiento de la impresión 3D. Más tarde, en la década de 1990, se crearon proyectos con mayor interés y empezaron a surgir empresas, lo que hizo que la impresión 3D revolucionará la industria (Tânase, 2016).

Aunque la sociedad está constreñida a creer que esto sólo se aplica a objetos pequeños, hay numerosos objetos que pueden producirse en tres dimensiones. Actualmente, es posible imprimir los componentes de una estructura comercial. Dado que el diseño es uno de los elementos clave para el correcto desarrollo y producción de infraestructuras, la impresión 3D está a punto de tener un impacto en los campos de la ingeniería y la arquitectura. (Honrubia, 2014)

Emotiv Eloc X

En esta sección se presenta el dispositivo que se utilizará en este trabajo y se describen sus principales características.

El Emotiv Eloc X es una diadema que recoge la actividad eléctrica cerebral y separa la señal en varios tipos de onda en función de la frecuencia. Abarca los lóbulos frontal y prefrontal, así como los lóbulos temporal, parietal y occipital. Utiliza el sistema internacional 10-20.

Figura 1

Diadema giratoria EPOC X de 14 canales



Nota. En la imagen se muestra la diadema con 14 sensores EEG. Tomada de <https://emotiv.gitbook.io/epoc-x-user-manual/introduction/introduction-to-epoc-x>

EPOC X tiene en cada sección sensores ubicados en 9 posiciones (7 sensores + 2 referencias).

Tabla 2*Listado de especificaciones técnicas de la diadema EPOC X*

Número de canales	14 (más referencias CMS/DRL ubicaciones P3/P4 M1/M2)
10-20 posiciones	AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4
Método de muestreo	Muestreo secuencial. ADC único
Frecuencia de muestreo	128 MSF / 256 MSF (2048 Hz interno)
Resolución EEG	14 bits 1 LSB = 0.51 μ V (ADC de 16 bits, se descarta el piso de ruido instrumental de 2 bits), la configuración se puede cambiar a 16 bits
Ancho de banda	0.2 - 45Hz, filtros de muesca digital 50Hz y 60Hz
Filtrado	Filtro Sinc digital de 5 ^º orden incorporado
Rango dinámico (entrada referida)	8400 uV(pp)
Modo de acoplamiento	AC acoplado
Conectividad	Inalámbrico patentado de 2,4 GHz, BLE y USB (solo extensor)
Duración de la batería	Hasta 9 horas (LiPo)
Medición de impedancia	Calidad de contacto en tiempo real utilizando un sistema patentado
Sensor de movimiento	ICM-20948

Acelerómetro	3 ejes +/-4g
Magnetómetro	3 ejes +/- 4900 uTesla
Muestreo de movimiento	32 / 64 Hz
Propuesta de resolución	14 / 16 bits (definido por el usuario)

Nota. Especificaciones técnicas de la diadema EPOC X. Tomada de <https://emotiv.gitbook.io/epoc-x-user-manual/introduction/technical-specifications>

Controlador ESP8266

El controlador ESP8266 fue diseñado por Espressif Systems, es una empresa china cuya sede se encuentra en Shangai, es un chip Wi-Fi de bajo costo, con este dispositivo se puede controlar entradas como salidas, es un dispositivo especialmente usado para diferentes proyectos de domótica e internet de las cosas.

Figura 2.

Chip wifi ESP8266-12E



Nota. En la imagen se muestra el chip ESP8266. Tomada de <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp8266-wifi-transceiver-review/>

Emotiv BCI

Es un software que sirve como interfaz entre cerebro- computador, donde crearemos perfiles de entrenamiento usando flujos de datos en tiempo real, comandos mentales, expresiones faciales , que nos permiten realizar aplicaciones para controlar máquinas con nuestros pensamientos.

Plataforma Node-Red

Es una herramienta de programación de flujo basada en Node.js proporciona una prueba de entrada a la tecnología IoT , es una herramienta basada en nodos de código abierto creada por IBM

Emotiv -BCI Node-RED Toolbox

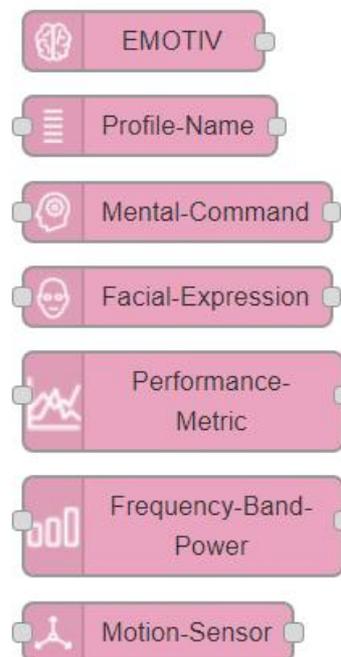
Es una biblioteca personalizada de nodos de entrada para Node-Red que permite utilizarse a la par con la aplicación Emotiv-BCI creando una amplia variedad de integraciones de interfaz cerebro- computador (BCI),

Mediante esta biblioteca se puede acceder a través de la nube, y realizar integraciones con Node-RED

A continuación se presenta las diferentes nodos de EMOTIV para integrarlos con Node-RED

Figura 3.

Biblioteca de Nodos personalizados del programa Emotiv-BCI



Nota. En la imagen se muestran los nodos personalizados para interactuar con el programa EMOTIV-BCI y Node-RED . Tomada de <https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-emotiv-bci>

Protocolo MQTT

Es un protocolo de mensajería simple, diseñado para dispositivos con poco ancho de banda. Es una opción para intercambiar datos entre múltiples dispositivos IoT.

La comunicación MQTT funciona como un sistema de publicación y suscripción

Broker MQTT

El corredor MQTT es responsable de recibir todos los mensajes, escogerlos o filtrarlos para luego decidir quién está interesado en estos mensajes para luego publicar el mensaje para los clientes suscritos.

2.2 Descripción de la propuesta

a. Estructura general

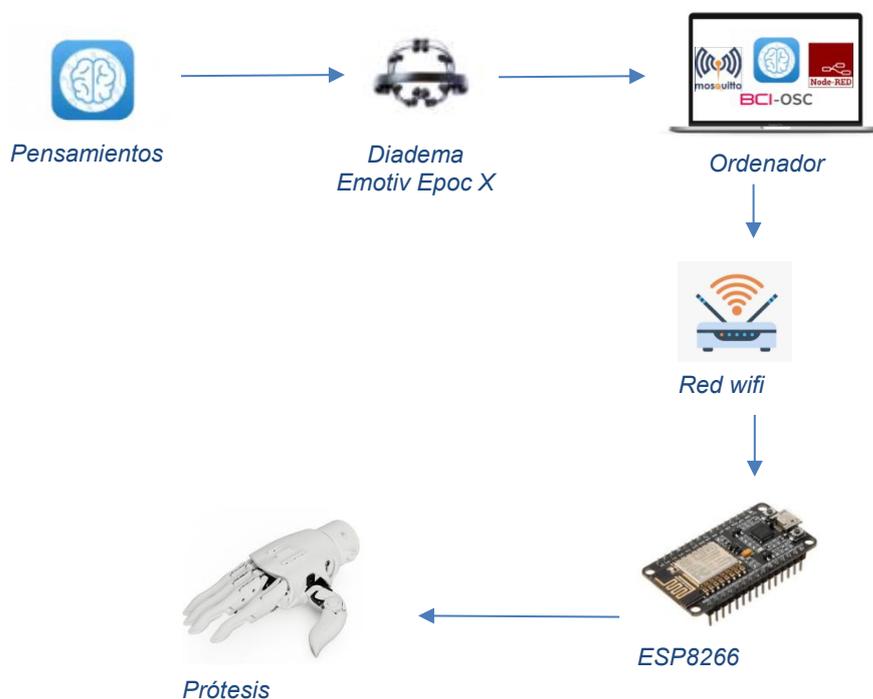
En esta propuesta se han realizado las siguientes actividades para poder cumplir con los objetivos planteados:

- Impresión de la prótesis
- Instalación del programa NODE-RED y el Broker Mosquitto.
- Desarrollar un flujo de nodos en NODE-RED para registrar y enviar datos de EEG
- Establecer la comunicación entre la diadema EPOC X, el program NODE-RED, el corredor Mosquitto y el cliente módulo ESP8266
- Programación del módulo ESP8266 para captar las señales y efectuar los movimientos de agarre y extensión
- Pruebas de agarre y extensión de la prótesis mediante los comandos de neutral y push

En el desarrollo de este proyecto podemos evidenciar un resumen en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 4

Organigrama del desarrollo del proyecto



Nota. En la imagen se muestra la secuencia que se obtiene a partir de los pensamientos que son captados por la diadema, procesados en el programa EMOTIV BCI para el movimiento de agarre y extensión de la prótesis.

Las actividades para el correcto funcionamiento han sido evaluadas por profesionales de salud que pertenecen al área de rehabilitación, para dar un criterio objetivo de la propuesta planteada.

- b. Explicación del aporte

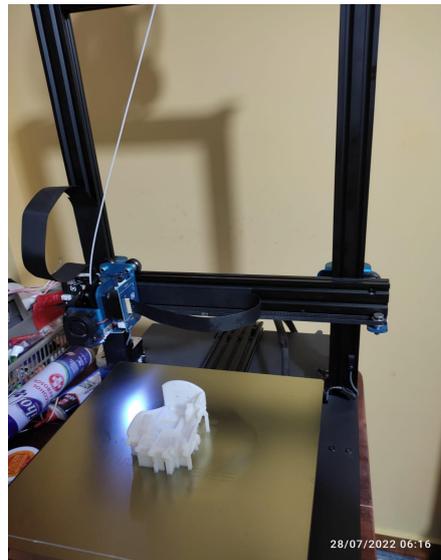
La impresión de la prótesis se la realiza en una impresora de fundición de filamento, en nuestro caso en una impresora Artillery X1, es una impresora de extrusión directa, entre las características más destacadas tenemos que el volumen de trabajo es de 300 x 300 x 400 mm, la velocidad de impresión máxima es 150 mm/s, los materiales que se usa para la impresión son PLA, ABS, PET-G, PLA Flexible etc. En nuestro caso usamos plástico de ácido poliláctico PLA, al ser un prototipo de prueba este material nos facilita en la impresión, en la Figura 3 se presenta la impresión de una parte de la prótesis.

Prótesis impresa en 3D

El desarrollo de la prótesis de la mano se basa en el proyecto de código abierto Hackberry prótesis de mano diseñada y lanzada por la empresa exii la carcasa está fabricada por impresión 3D, desde Septiembre del 2016 fue absorbida por Mission Arm Japan una corporación específica sin fines de lucro, y aún está mejorando y difundiendo actividades

Figura 5

Impresora Artillery X1



Nota. Impresión de una parte de la prótesis en material PLA

El diseño se basó en una prótesis de código abierto creada por la empresa japonesa Exii, que lleva años estudiando el uso de la impresión 3D para crear prótesis, esta prótesis cuenta con mejores características de flexión y extensión, ya que las tradicionales prótesis descritas en investigaciones similares usan cuerdas para el movimiento de flexión y extensión de las articulaciones interfalángicas que con el tiempo sufren desajustes y provocan un mal

funcionamiento de los movimientos descritos , se optó por imprimir el miembro superior derecho.

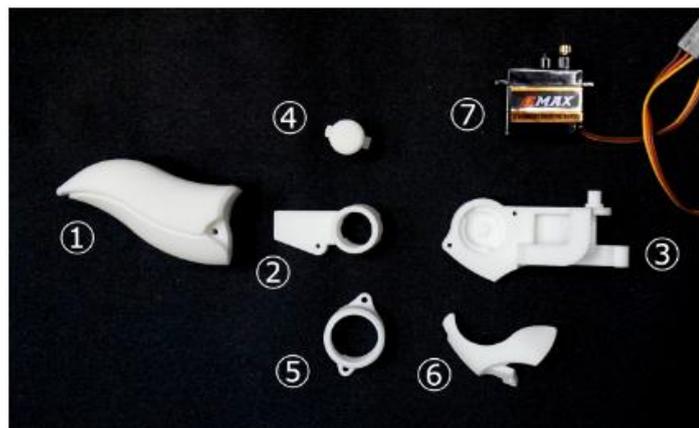
Como ejemplo se pone el montaje del dedo pulgar para esto se necesita diferentes elementos impresos y accesorios según la figura 6.

Se enumeran las siete partes necesarias que conforman el dedo pulgar derecho impresas en 3D para el ensamblaje conjuntamente con un servomotor. En la imagen se observa el número encerrado en un círculo que corresponde de cada parte que se describe en la siguiente lista

1. dedo pulgar pieza uno
2. dedo pulgar pieza dos
3. dedo pulgar pieza tres
4. dedo pulgar pieza cuatro
5. dedo pulgar pieza cinco
6. dedo pulgar pieza seis
7. Servomotor pieza siete

Figura 6

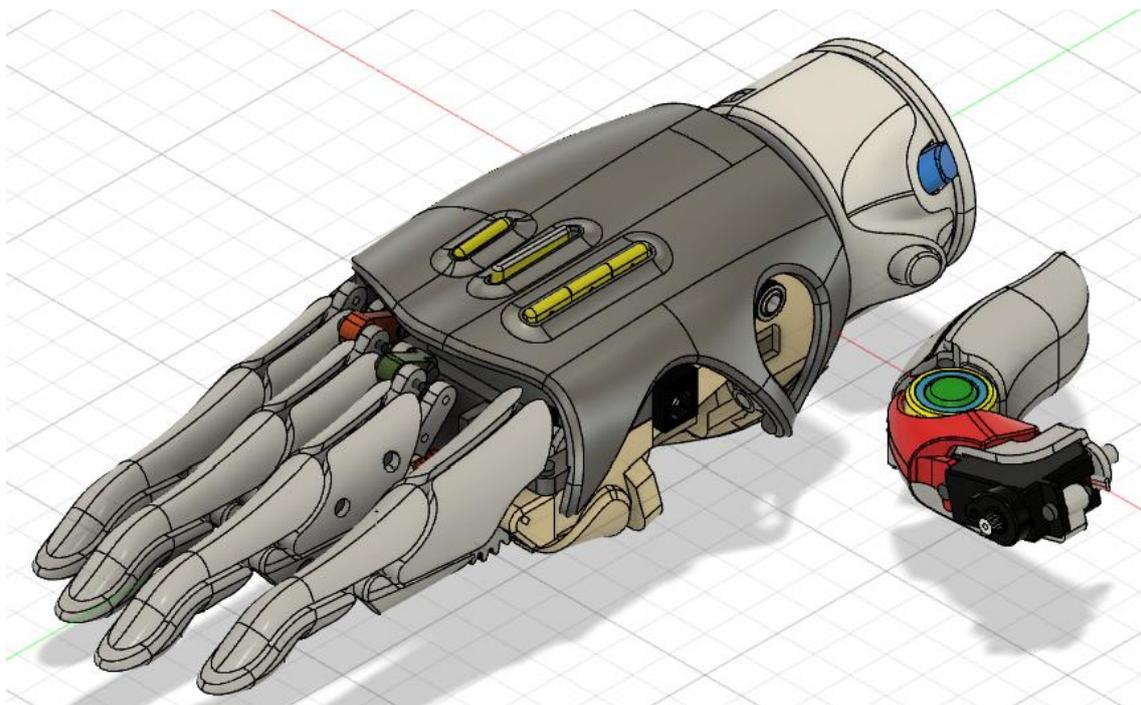
Piezas que componen el dedo pulgar de la prótesis

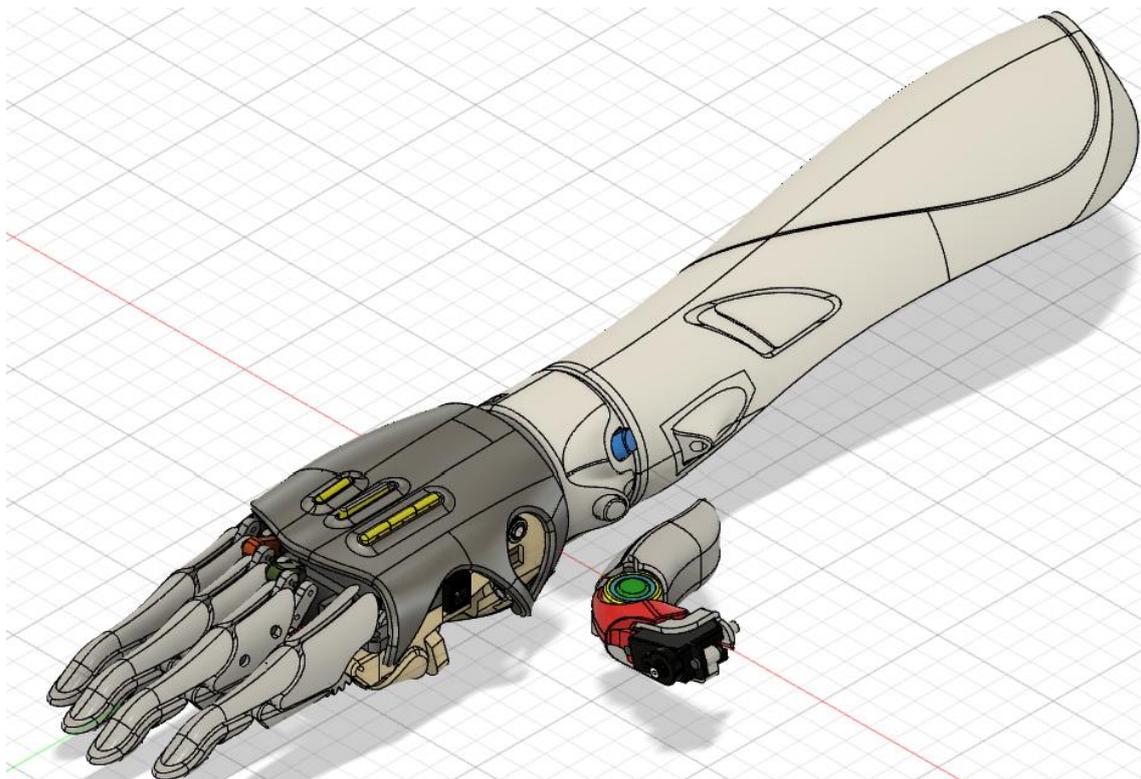


Nota. En la imagen se muestran las 7 partes de las que está compuesto el dedo pulgar de la prótesis. Tomado de User manual to assemble and customize HACKberry Produced by misión arm Japan (2018).exiii-hackberry.com

Figura 7

Prótesis de articulaciones en 3D en programa Fusión 360





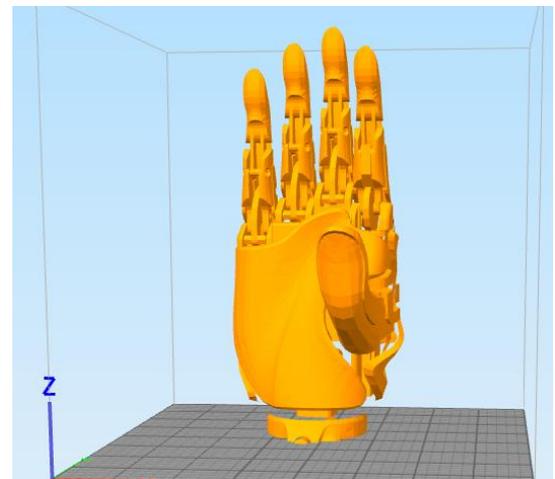
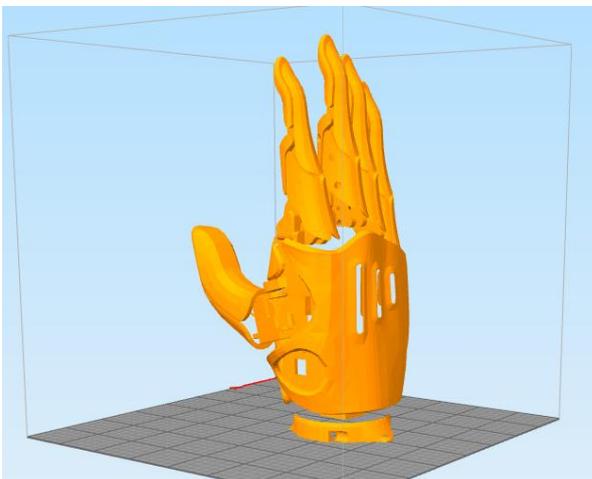
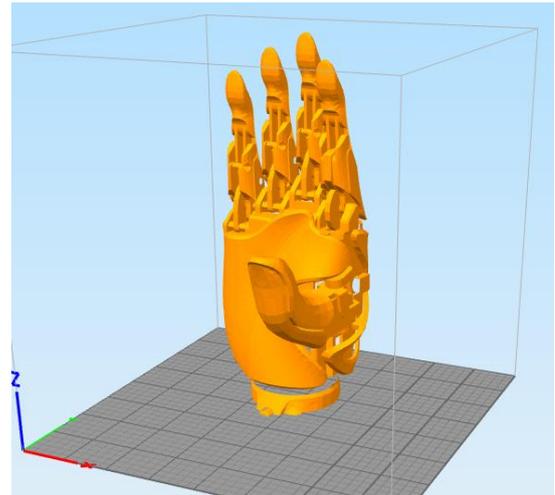
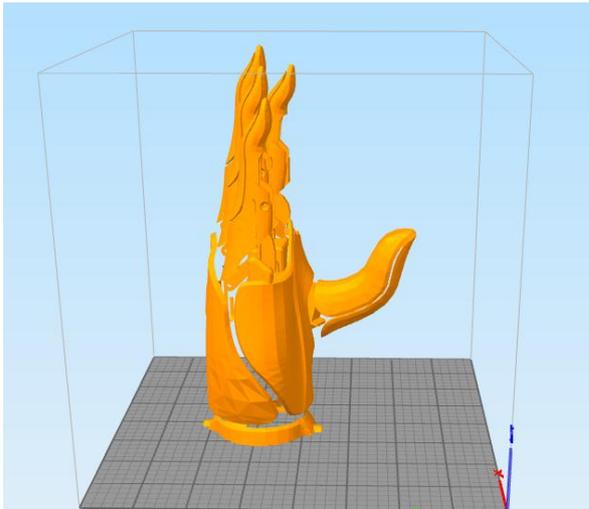
Nota. En la imagen se muestra el diseño de la prótesis tomado del proyecto de la empresa exiii-hackberry.com

Todas las piezas de la prótesis son cargadas a un software para generar el archivo que nos permitirá realizar la impresora 3D.

A continuación, se presenta la prótesis en 3D laminada para la impresión en una impresora de fundición de filamento, la laminación debe realizarse por separado de todas las piezas que conforman la prótesis.

Figura 8

Prótesis de articulaciones interfalángicas listas para impresión 3D



Nota. En la imagen se muestra la prótesis en el programa simplify3D

Figura 9

Piezas que componen el dedo índice de la prótesis



Nota. En la imagen se muestra la impresión resultante de las diferentes partes que componen el dedo índice de la prótesis

Figura 10

Prótesis impresa en impresora de fundición de filamento y completamente armada



La prótesis se puede manipular a través de señales eléctricas de los músculos o señales ECG mediante la interfaz BCI ya que existen casos que no existe moñón el cual ayuda en la funcionalidad de prótesis tradicionales.

Mediante señales eléctricas emitidas por el cerebro están son captadas por la Diadema EPOC X las mismas que son procesadas digitalmente en un ordenador el cual tiene instalado el programa Emotiv Launcher que es una interfaz de instalación e inicio de sesión para todas las aplicaciones EMOTIV que sirven para diferentes estudios, la aplicación EMOTIV BCI que se usa

permite entrenar un perfil, enviar comandos mentales, expresiones faciales o métricas de rendimiento a un dispositivo externo conectado a la red, que interactúa con una placa ESP8266 para luego controlar la prótesis realizando las maniobras de agarre y extensión.

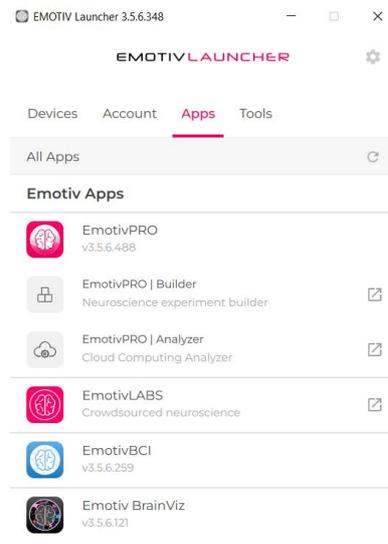
Entrenamiento de comandos null y push del sensor Emotiv Epoc X

En esta sección se mostrará cual es el entrenamiento que se requiere hacer para que los comandos como null y push sean generados en el programa EMOTIV BCI para luego ser usados para actuar en la prótesis tanto en el agarre como en la extensión.

Para realizar el entrenamiento es necesario colocar en la cabeza la diadema emotiv EPOC X que mantiene comunicación mediante el dongle del receptor USB al ordenador y proporciona una conexión dedicada y estable a la aplicación con el programa Emotiv BCI que se encuentra dentro de las aplicaciones que tiene la aplicación EMOTIV LUNCHER como se observa en la Figura 11

Figura 11

Programa EmotivLauncher



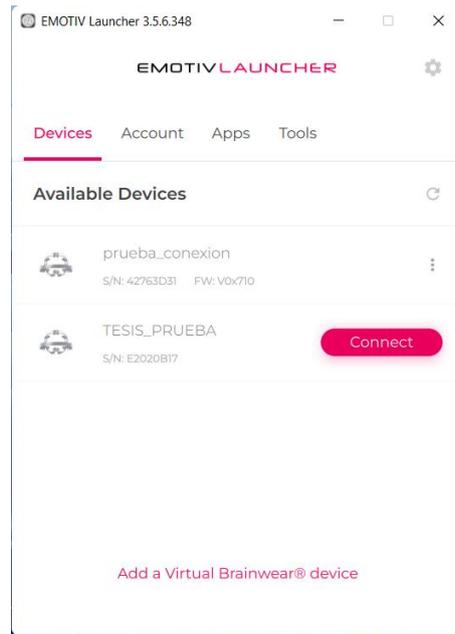
Nota. En la imagen se muestra las aplicaciones que conforman el programa EmotivLauncher una de las cuales la usaremos para realizar el entrenamiento de los comandos mentales que es la aplicación EmotivBCI

El programa EmotivLauncher tiene cuatro submenús que son: Devices, Account, Apps y Tools

En el el menú Devices tenemos dos opciones de conexión uno que es una prueba sin usar la diadema Emotiv X, es una simulación si no tuviéramos la diadema, y la otra opción es usando la diadema Emotiv X físicamente como se puede visualizar en la Figura 12

Figura 12

Menú de dispositivos para ser usados

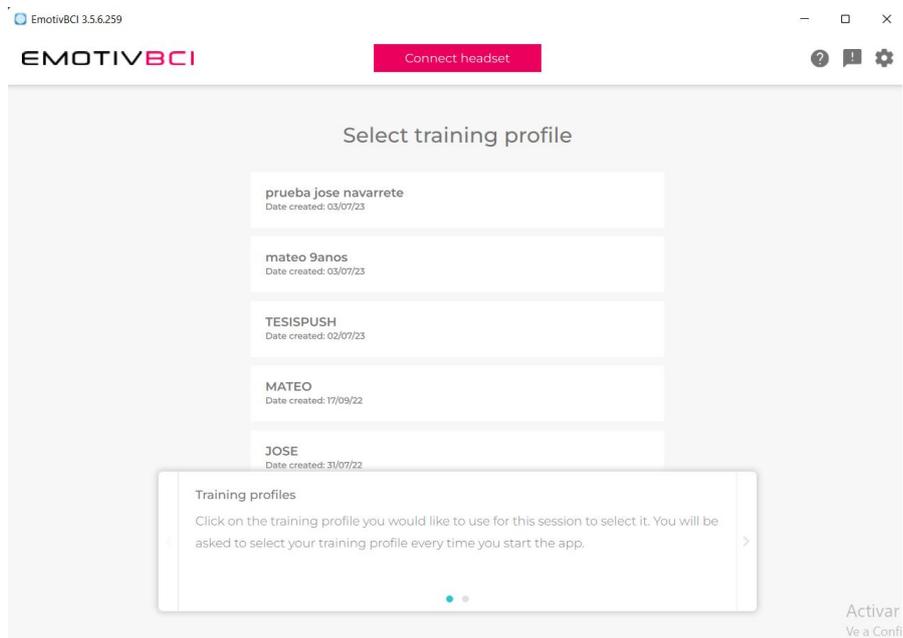


Nota. En la imagen se aprecia la opción de una diadema en formato de simulación y también la diadema que requiere ser usada físicamente.

En Apps nosotros escogemos la aplicación EmotivBCI la cual abre una lista de perfiles de entrenamiento como se observa en la Figura 13 donde se puede realizar el entrenamiento de diferentes comandos mentales para nuestro caso se escoge prueba jose navarrete.

Figura 13.

Menú para seleccionar perfiles de entrenamiento



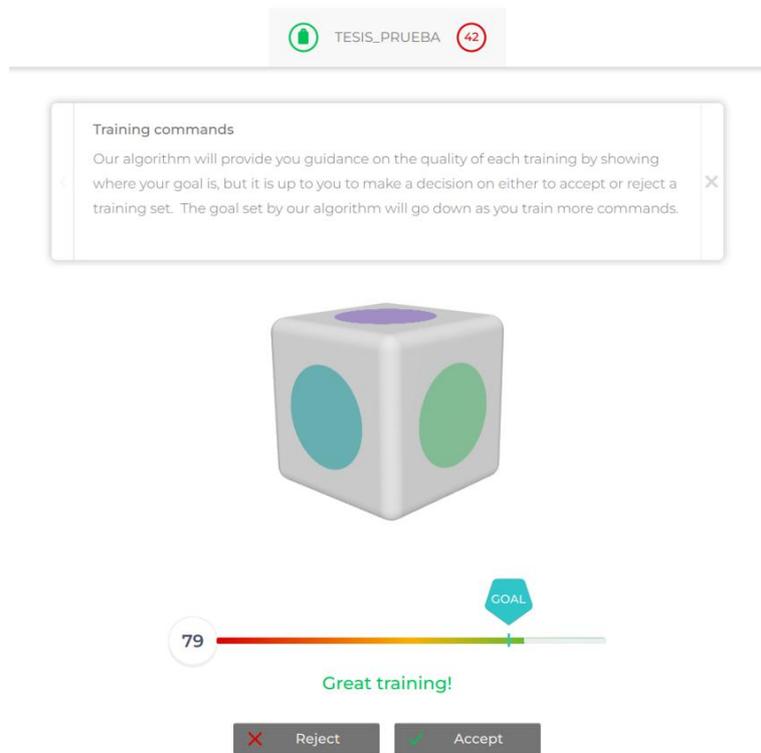
Nota. En la imagen se muestran algunos perfiles de entrenamiento, el usado para nuestro proyecto es el que tiene como nombre prueba jose navarrete.

En este caso el perfil que se ha entrenado corresponde a dos comandos mentales que son Neutral y Push

El programa Emotiv-BCI usa un cubo para entrenar los comandos mentales de los usuarios, por ejemplo para entrenar el comando PUSH el cubo avanza de una ubicación a otra, viendo como resultado que el tamaño del cubo cambia de grande a pequeño como se visualiza en la figura 14

Figura 14.

Cubo de entrenamiento para comandos mentales

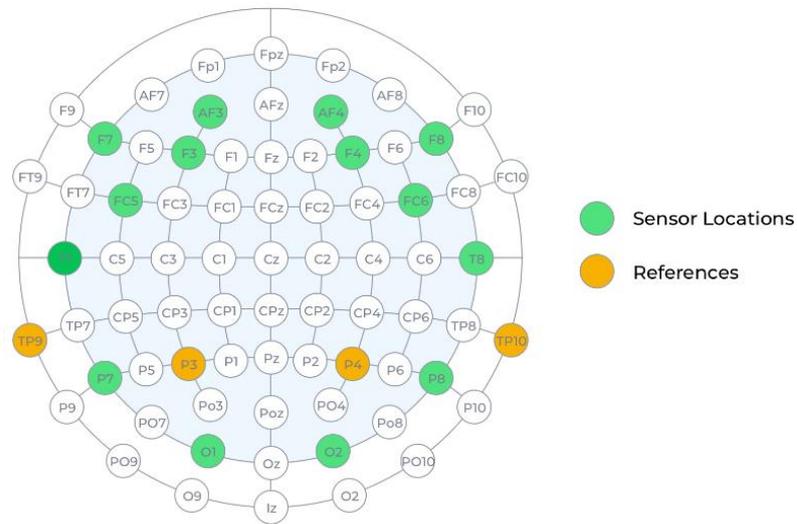


Nota. Calidad del objetivo de entrenamiento del comando PUSH para ser aceptado

En nuestro caso se usará la diadema EPOC X facilita el alcance tanto en los lóbulos frontal y prefrontal; también se tiene alcance de los lóbulos temporal, parietal y occipital. En la figura 15 se ubican los sensores para la diadema EPOC X usando el sistema internacional 10-20.

Figura 15.

Ubicación de sensores para la diadema Eloc X usando el sistema internacional 10-20



Nota. En la imagen se muestra la ubicación de los sensores y sus referencias de acuerdo con el sistema internacional 10-20. Tomado de <https://emotiv.gitbook.io/epoc-x-user-manual/introduction/introduction-to-epoc-x/coverage>

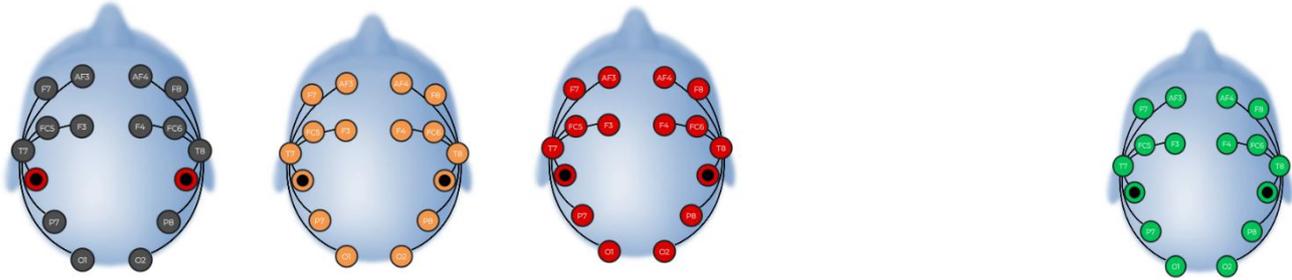
Como se ilustra en la figura 16 a continuación, es importante tener en cuenta que los 14 electrodos se encuentren en un buen estado de conexión color verde antes de continuar con el entrenamiento. Esto garantizará que el sensor haga buen contacto con el cuero cabelludo y que la señal de EEG sea de alta calidad.

Como se mencionó todos los sensores deben estar en verde para obtener mejores resultados de respuesta. Básicamente, hay cuatro colores mientras un usuario se pone los auriculares de la siguiente manera:

- a. Gris: sin señal, no es correcto para el sensor; el usuario necesita mover el auricular hasta que cambia a otro color.
- b. Rojo: malo, empieza a reconocer el sensor pero necesita moverse un poco más para cambiar a naranja.
- c. Naranja: pobre, se ajusta pero no es perfecto, el usuario necesita mover el auricular un poco para obtener color verde.
- d. Verde: bueno, es un ajuste perfecto del sensor, se recomienda tener verde para obtener resultados perfectos.

Figura 16.

Estado de los sensores electroencefalograma (EEG)



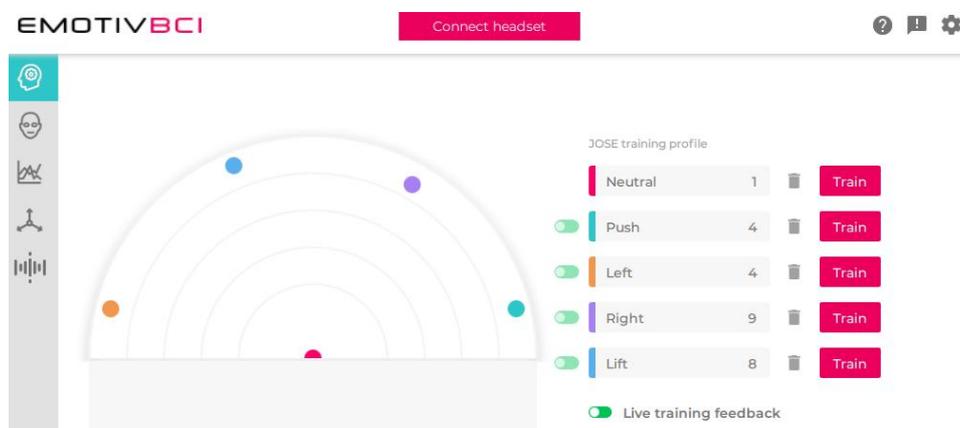
Nota. En la imagen se muestra el estado de contacto con el cuero cabelludo de los sensores.

Ya realizado el entrenamiento a través del programa EMOTIVBCI se genera las diferentes señales de control como son neutral, push como se observa en la figura 17 en el perfil de prueba José y el diagrama cerebral donde indica mediante puntos de diferentes colores los diferentes estados que se entrenaron

Hay que considerar que cuanto más separados estén los puntos en el diagrama, mejor separados están los comandos en el perfil de entrenamiento y será más fácil encontrarlos para activarlos de forma independiente. Cuanto más cerca estén entre sí, más similares serán y más difícil le resultará activarlos de forma separada.

Figura 17.

Diagrama cerebral con diferentes estados de entrenamiento



Nota. En la imagen se muestran los diferentes estados de acuerdo con el comando mental entrenado, representados con puntos de diferentes colores.

El comando mental Neutral no realizará ninguna acción para el movimiento de las articulaciones interfalángicas de la prótesis.

El comando Push efectuará la acción de flexionar todas las articulaciones interfalángicas de la prótesis

El comando Push es receptado por el circuito integrado ESP8266 el valor de la intensidad del comando es traducido de acuerdo al comando ejecutado y activando la acción de control correspondiente en la prótesis.

Instalación y ejecución de Node-RED

Primero abrimos en nuestra computadora el cmd

Usamos el comando

```
npm install -g --unsafe-perm node-red
```

El comando instalará Node-RED como un módulo global junto con sus dependencias, se confirma que la instalación es correcta como se observa en la figura 18, si al final de la ejecución del comando, la salida es similar que se muestra

Figura 18

Salida del comando `npm install -g --unsafe-perm node-red`



```
+ node-red@1.1.0
added 332 packages from 341 contributors in 18.494s
found 0 vulnerabilities
```

Nota. La imagen muestra si el programa Node-RED está correctamente instalado. Tomado de <https://nodered.org/docs/getting-started/local>

El Prototipo de la prótesis controlado mediante ondas cerebrales que en base a un previo entrenamiento en el programa EmotivBci mediante la diadema Emotiv Epoc X compuesta por 14 electrodos generan señales EEG que son captadas en la nube y mediante EMOTIV-BCI se lo usa como flujo de datos hacia el Arduino, la conexión se hace a través de Node-RED , las ondas cerebrales mediante la interfaz BCI a través de comandos mentales ya entrenados

La prótesis tiene instalado tres servomotores los cuales accionan individualmente las articulaciones interfalángicas del dedo índice con un servomotor

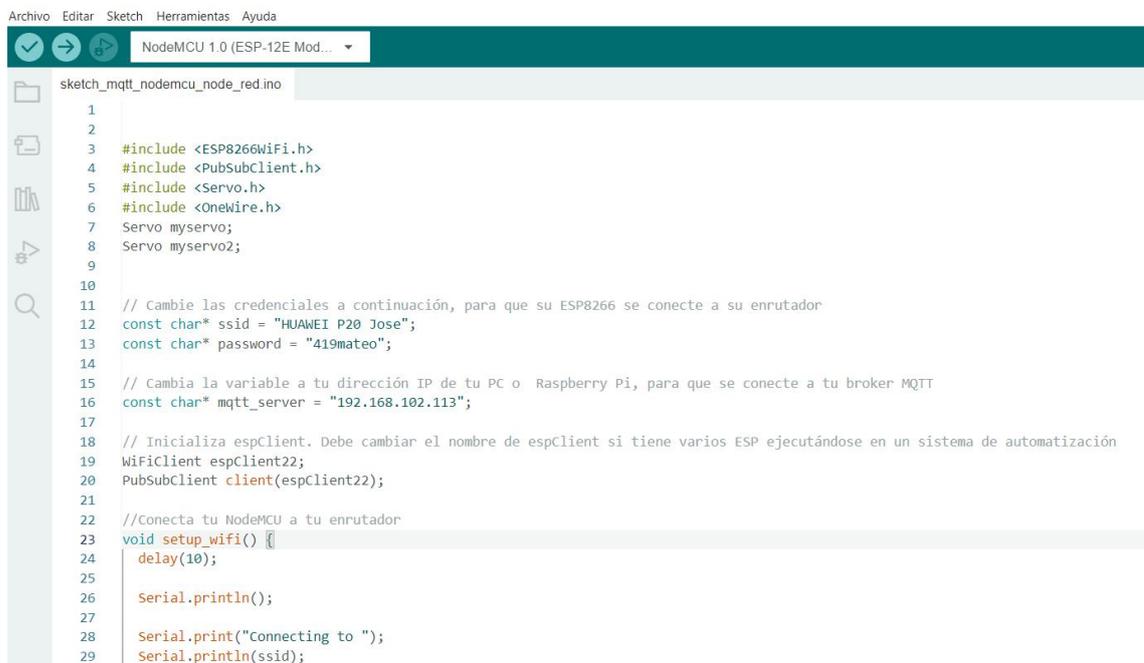
Las articulaciones del dedo meñique, anular y medio con otro servomotor, y por último el dedo pulgar será accionado por otro servomotor.

Implementación del programa en el ESP8266 y Arduino nano mediante el programa de Arduino IDE

A través del software IDE de Arduino se elabora el algoritmo para la adquisición y transmisión de datos que se generan en la diadema Emotiv Epoc X como se muestra en la figura 19 para activar los servomotores que conforman la prótesis mediante los comandos mentales Neutral y Push proporcionados por los canales de salida del módulo ESP8266.

Figura 19.

Programa en el software Ide de Arduino



```
Archivo  Editar  Sketch  Herramientas  Ayuda
NodeMCU 1.0 (ESP-12E Mod...
sketch_mqtt_nodemcu_node_red.ino
1
2
3 #include <ESP8266WiFi.h>
4 #include <PubSubClient.h>
5 #include <Servo.h>
6 #include <OneWire.h>
7 Servo myservo;
8 Servo myservo2;
9
10
11 // Cambie las credenciales a continuación, para que su ESP8266 se conecte a su enrutador
12 const char* ssid = "HUAWEI P20 Jose";
13 const char* password = "419mateo";
14
15 // Cambia la variable a tu dirección IP de tu PC o Raspberry Pi, para que se conecte a tu broker MQTT
16 const char* mqtt_server = "192.168.102.113";
17
18 // Inicializa espClient. Debe cambiar el nombre de espClient si tiene varios ESP ejecutándose en un sistema de automatización
19 WiFiClient espClient22;
20 PubSubClient client(espClient22);
21
22 //Conecta tu NodeMCU a tu enrutador
23 void setup_wifi() {
24   delay(10);
25
26   Serial.println();
27
28   Serial.print("Connecting to ");
29   Serial.println(ssid);
```

Nota. En la imagen muestra el algoritmo para ser cargado en el módulo ESP8266 que controla la prótesis mediante los comandos para la acción de agarre y extensión.

Se define la librerías a usar en el programa:

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <Servo.h>
#include <OneWire.h>
```

Se escribe la dirección IP de nuestro ordenador para que el ESP8266 se conecte a nuestro bróker o corredor.

```
const char* mqtt_server = "192.168.102.113";
```

Inicializa espClient. Debe cambiar el nombre de espClient si tiene varios ESP ejecutándose en un sistema de automatización

```
WiFiClient espClient22;  
PubSubClient client(espClient22);
```

Función para conectar el ESP8266 a nuestro enrutador

```
void setup_wifi() {  
  delay(10);
```

Esta función se ejecuta cuando algún dispositivo publica un mensaje en un tema al que está suscrito el ESP8266

```
void callback(String topic, byte* message, unsigned int length) {
```

Esta función reconecta el ESP8266 a nuestro bróker o corredor MQTT

```
void reconnect() {
```

Configuración de las GPIO ESP en salidas, se inicia la comunicación a una velocidad de 115200 baudios, se configura el broker mqtt, adicional se configura la función de devolución de llamada la que recibe los mensajes y controla la salida.

```
void setup() {  
  Serial.begin(115200);  
  myservo.attach(2);  
  myservo2.attach(4);  
  setup_wifi();  
  client.setServer(mqtt_server, 1883);  
  client.setCallback(callback);
```

A continuación, se presenta el programa cargado en el Arduino Nano como se observa en la figura para accionar el dedo pulgar con los respectivos movimientos de aducción y abducción de la prótesis mediante dos pulsadores que controlan el respectivo accionamiento para poder hacer pinza con los demás dedos. .

Figura 20.

Programa para mover el dedo pulgar en el software Ide de Arduino

```

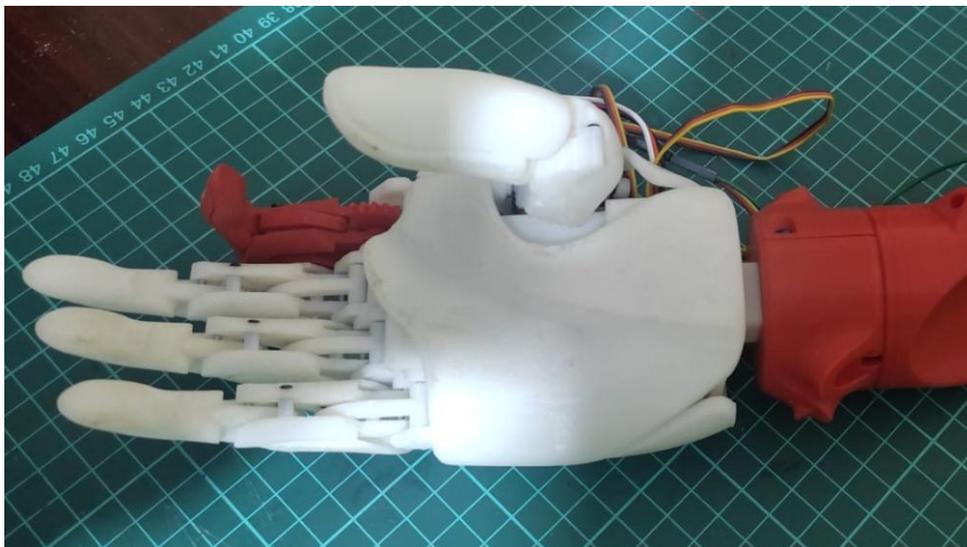
1  #include <Servo.h>
2
3  Servo mi_servo;
4
5  int grados = 90; // Inicializa en la posición 90°
6  int suma=6; // Boton para sumar angulo
7  int resta=7; // Boton para restar angulo
8
9  void setup() {
10
11     mi_servo.attach(8,750,1800); // Configura el Servo, 750ms = 0° y 1800 ms = 180°
12     pinMode(suma, INPUT); // Configuramos pines de entrada
13     pinMode(resta, INPUT);
14     mi_servo.write(grados); // Muevo el motor hasta 90°
15
16     //digitalWrite(suma,HIGH);
17     // digitalWrite(resta,HIGH);
18 }
19
20 void loop() {
21
22     if (digitalRead(suma) == LOW) // Pregunto por el boton suma = 12 Presionado, se activa con estado Bajo
23     {
24         grados++; // Suma grados
25
26         if (grados >= 180) // Proteje el motor, para que no exceda los 180°, se puede dañar el motor

```

A continuación, se presenta la prótesis cuando se encuentra el dedo pulgar en posición de aducción y abducción.

Figura 21.

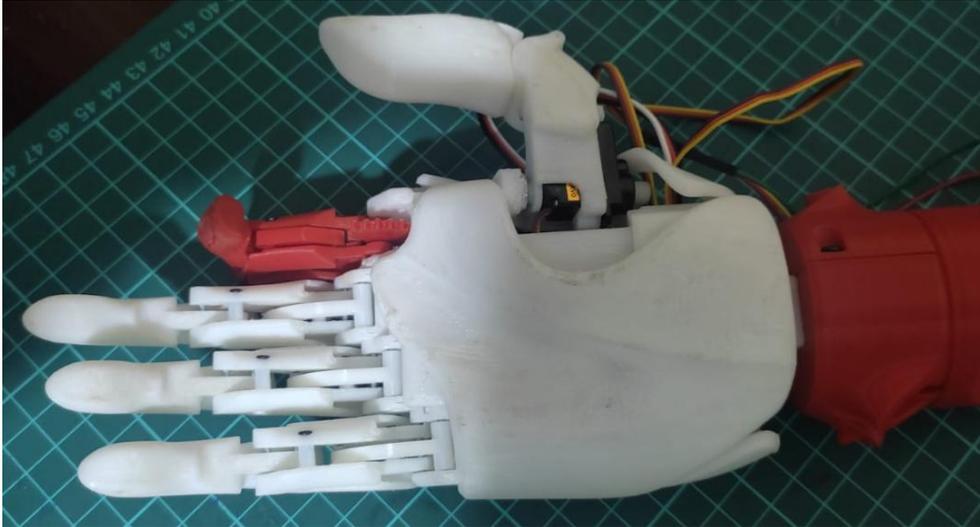
Dedo pulgar en posición de aducción



Nota. En la imagen muestra el dedo pulgar en posición de aducción para poder hacer la función de extensión.

Figura 22.

Dedo pulgar en posición de abducción



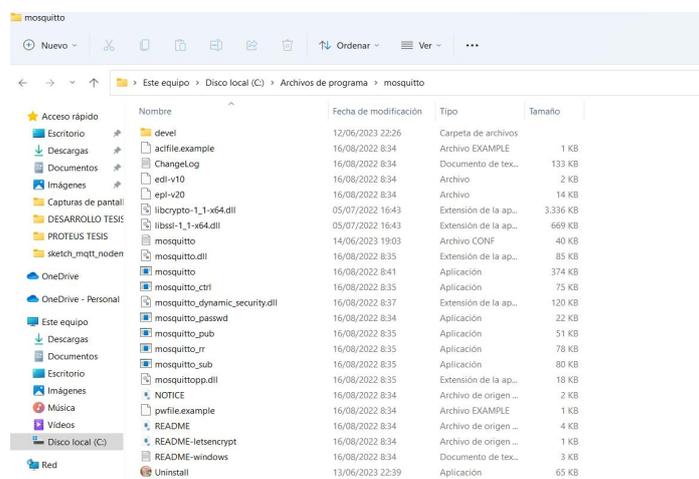
Nota. En la imagen muestra el dedo pulgar en posición de aducción para poder hacer la función de agarre con los demás dedos.

Broker Mosquito o corredor MQTT

Es necesario el bróker mosquito instalado en la computadora como se observa en la figura 23 de prueba para poder suscribir o publicar los mensaje enviados por la interfaz BCI que se requieren en el ESP8266 a través de comunicación MQTT para comandar las acciones de agarre y extensión de la prótesis de manera inalámbrica vía wifi.

Figura 23.

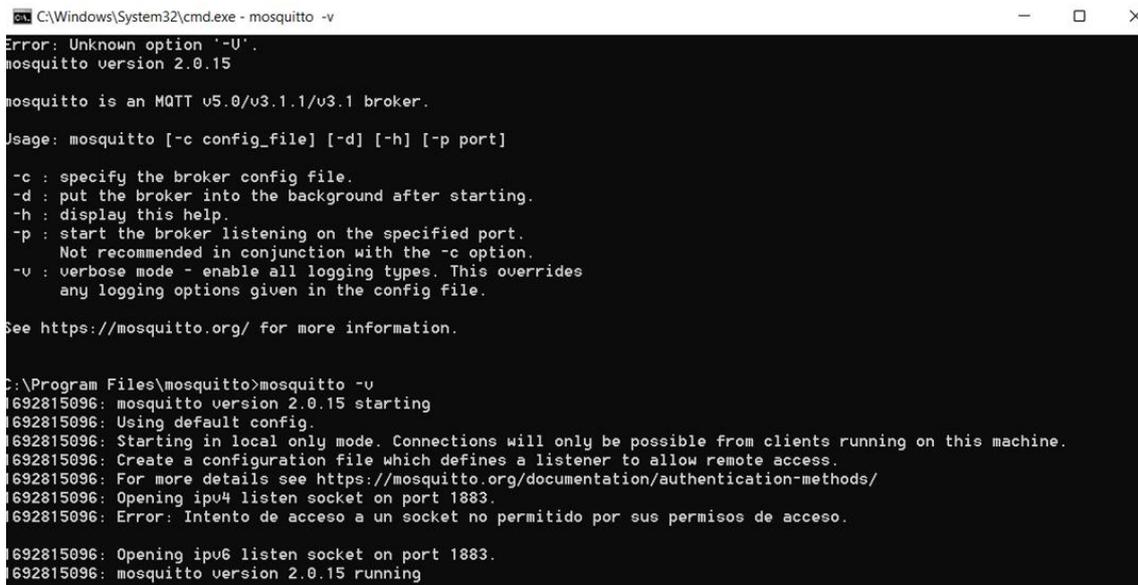
Programa Mosquito instalado en la computadora de prueba



Para empezar a controlar la prótesis, previamente hay que poner a correr el bróker mosquitto como se puede observar en la figura 24.

Figura 24.

Broker Mosquitto corriendo



```
C:\Windows\System32\cmd.exe - mosquitto -v
Error: Unknown option '-U'.
mosquitto version 2.0.15

mosquitto is an MQTT v5.0/v3.1.1/v3.1 broker.

Usage: mosquitto [-c config_file] [-d] [-h] [-p port]

-c : specify the broker config file.
-d : put the broker into the background after starting.
-h : display this help.
-p : start the broker listening on the specified port.
    Not recommended in conjunction with the -c option.
-u : verbose mode - enable all logging types. This overrides
    any logging options given in the config file.

See https://mosquitto.org/ for more information.

C:\Program Files\mosquitto>mosquitto -u
692815096: mosquitto version 2.0.15 starting
692815096: Using default config.
692815096: Starting in local only mode. Connections will only be possible from clients running on this machine.
692815096: Create a configuration file which defines a listener to allow remote access.
692815096: For more details see https://mosquitto.org/documentation/authentication-methods/
692815096: Opening ipv4 listen socket on port 1883.
692815096: Error: Intento de acceso a un socket no permitido por sus permisos de acceso.
692815096: Opening ipv6 listen socket on port 1883.
692815096: mosquitto version 2.0.15 running
```

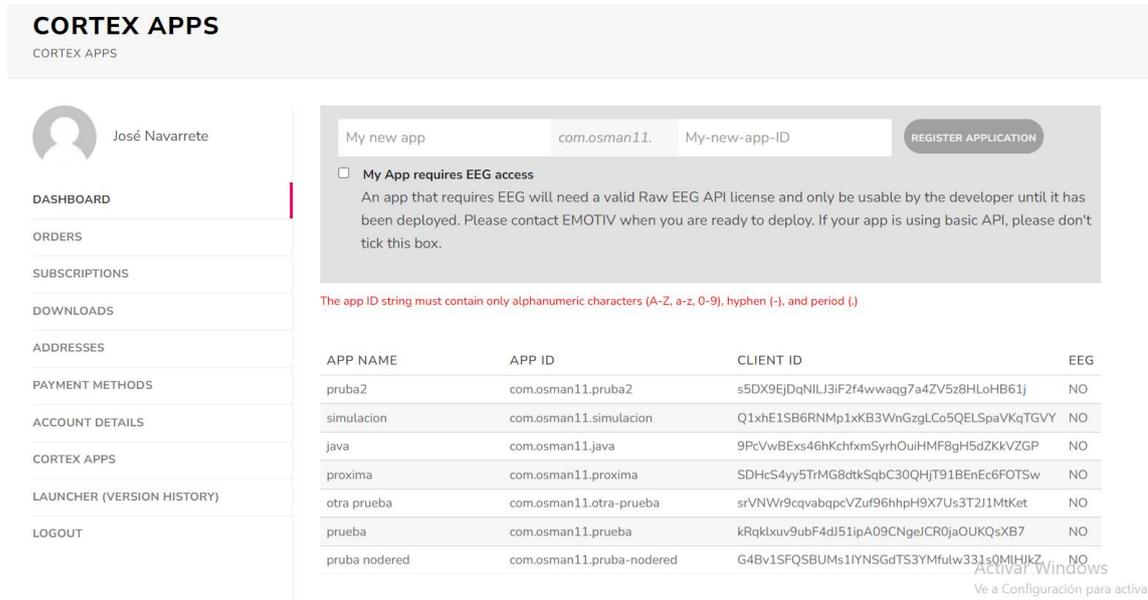
Implementación del programa en Node-RED

A través del software Node-RED se elabora el algoritmo para la adquisición y transmisión de datos que se generan en la diadema Emotiv Epor X.

Primeramente se usará la API de Cortex para poder usar el auricular EMOTIV y poder interactuar con las librerías de Emotiv en el programa Node-red como se observa en la figura 25.

Figura 25.

Cortex apps



Nota. En la imagen muestra la APP CORTEX para interactuar con otros programas de desarrollo.

En nuestro flujo de programación se usará los nodos de entrada y salida para comunicación MQTT, adicionalmente se usará el nodo debug para mirar cómo cambia el valor del comando mental PUSH de 0 a 100 así el tiempo de ejecución. cómo se observa en la figura 26

Figura 26.

Barra lateral de depuración



Nota. En la imagen muestra el valor del comando mental PUSH enviado por el auricular EMOTIV EPOC X con un valor de cero

Para iniciar con el flujo de programación en Node-Red necesitamos el nodo de inicialización para los nodos EmotivBCI. Este nodo devuelve un token de autenticación para ser utilizado con el nodo de comando mental PUSH.

Figura 27.

Nodo de inicialización MOTIV



Nota. En la imagen muestra el nodo de inicialización logueado con el usuario osman11

Ya conectados se procede a interactuar con node-red en nuestro caso usamos, el comando mental push como se observa en la figura 28, en la edición del nodo se puede seleccionar diferentes comandos mentales como se puede observar en la figura 29

Figura 28.

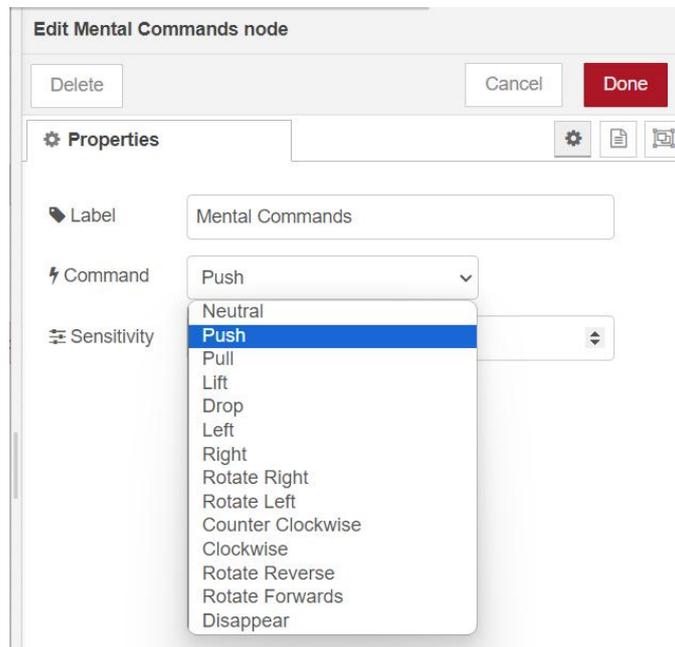
Nodo de comando mental Push



Nota. En la imagen muestra el nodo cuyo comando mental es PUSH el cual tiene el valor de 0 a 100 emitido por el auricular EMOTIV EPOC X.

Figura 29.

Editor de Nodo de comando mental escogiendo el comando Push



Nota. La imagen muestra la edición del nodo para seleccionar el comando Push

A continuación, creamos y configuramos una nodo de entrada mqtt como se puede observar en la figura 30.

Figura 30.

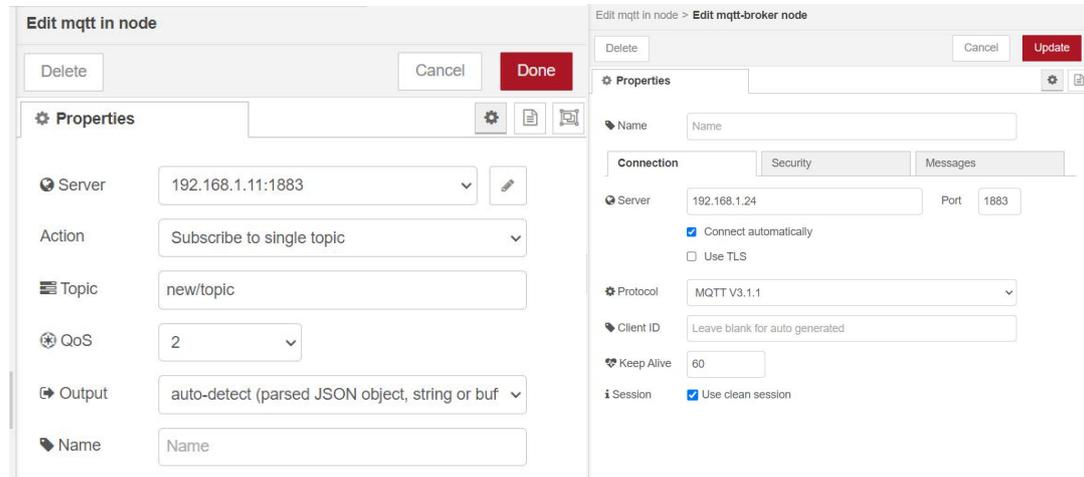
Nodo de entrada Mqtt



Para la configuración seleccionamos como servidor MQTT al instalado en la computadora el corredor mosquitto que se encuentra en la dirección 192.168.1.11:1883 suscribe mensajes.

Figura 31.

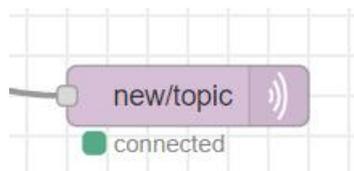
Configuración del Nodo de entrada Mqtt

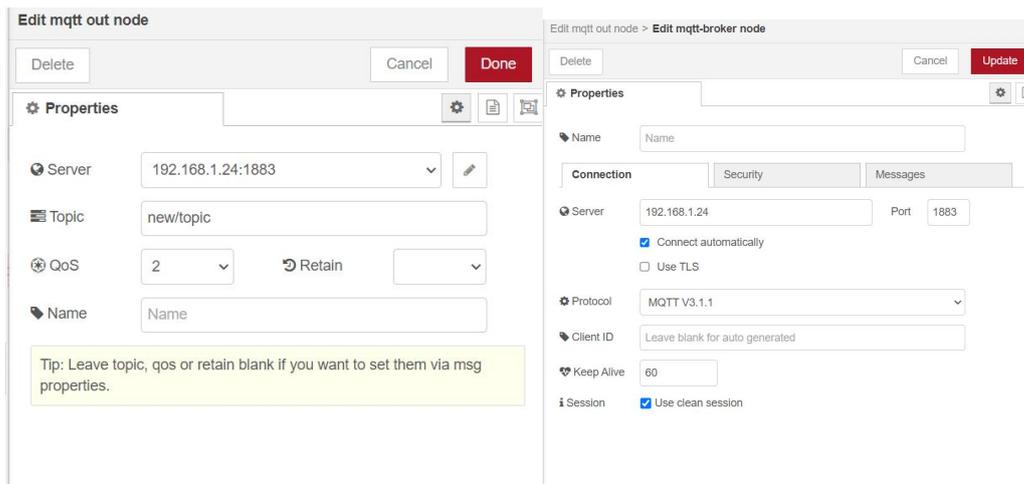


A continuación, configuramos el nodo de salida para que los datos sean recibidos por el circuito integrado ESP8266

Figura 32.

Configuración del Nodo de salida Mqtt





Esquema de la Placa Electrónica

Para la elaboración y el diseño de la placa se usó el programa Proteus versión 8.13. A continuación se presenta una imagen con el diseño realizado y los elementos utilizados

Se usa un Arduino nano para el movimiento individual del dedo pulgar de la prótesis, usa dos pulsadores que aumentan o disminuyen la flexión del dedo para obtener un mejor agarre con todo el conjunto de la prótesis, aquí se considera los movimientos de aducción y abducción

Un servomotor acciona el dedo índice, el otro servomotor acciona mecánicamente en conjunto el dedo medio, anular y meñique al mismo tiempo, de acuerdo al comando mental entrenado PUSH, mientras la señal que se ha entrenado se mantiene en un valor de registro superior a 65 entonces el agarre de la prótesis igual se mantiene, hasta que se regrese a un estado neutral (valor del registro igual a cero) donde la prótesis quedará en un estado de extensión.

Figura 33.

Esquema del circuito de la prótesis

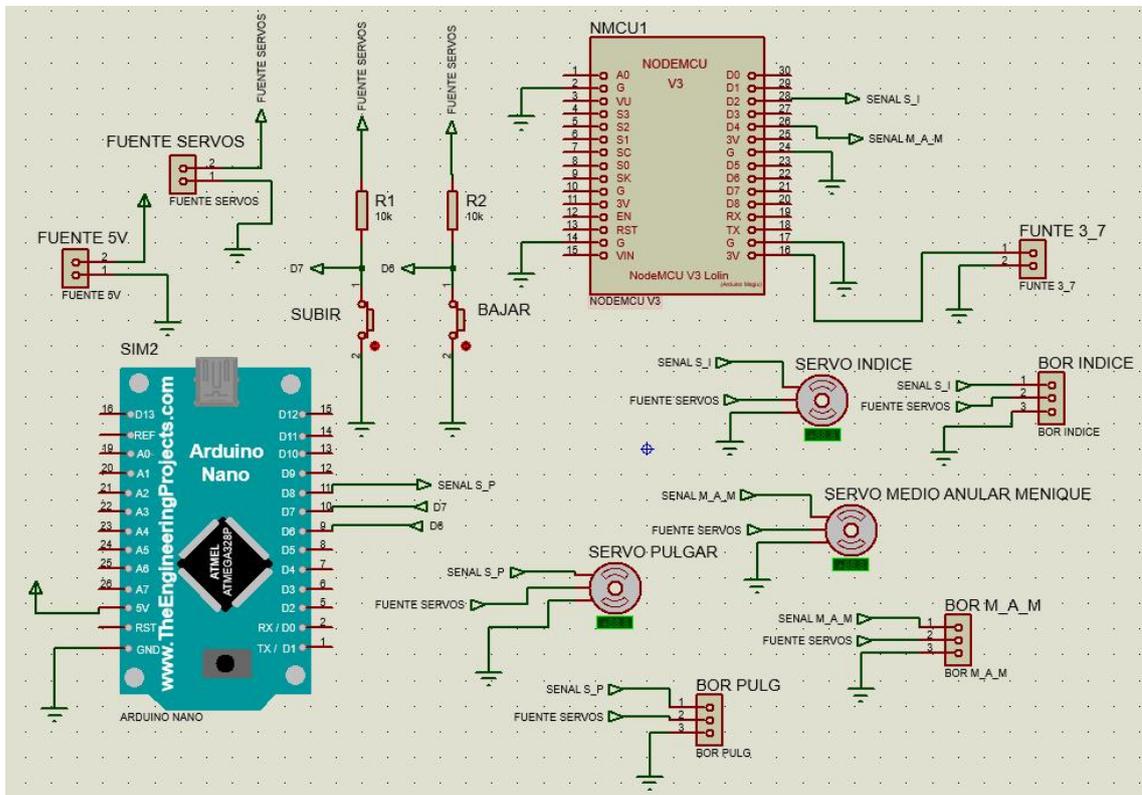


Figura 34.

PCB del esquema para el accionamiento de la prótesis

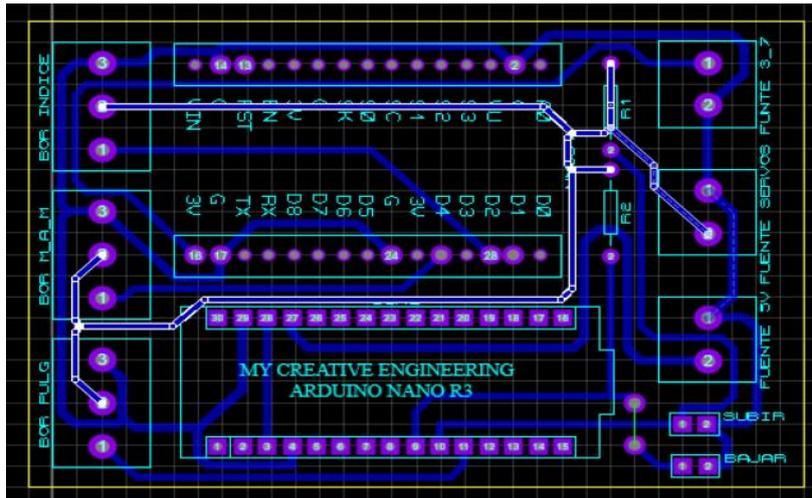
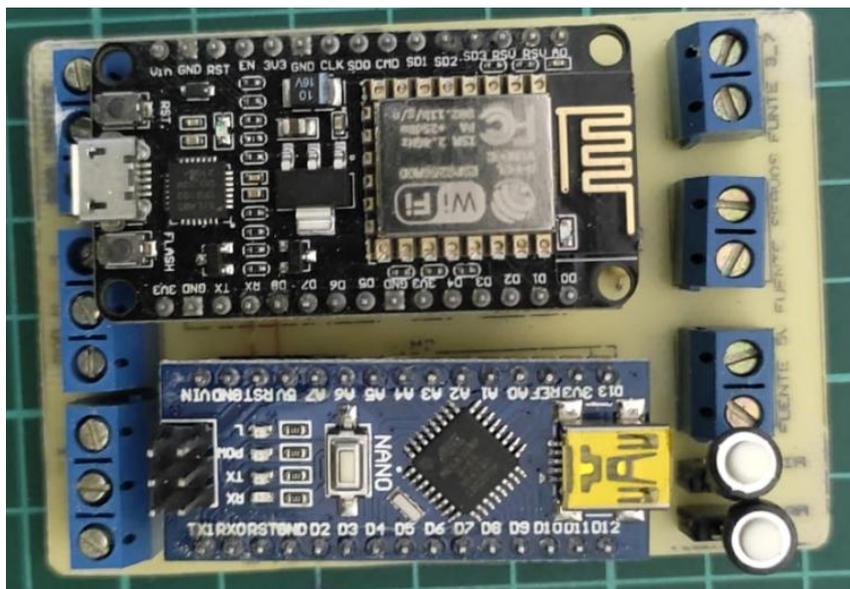


Figura 35.

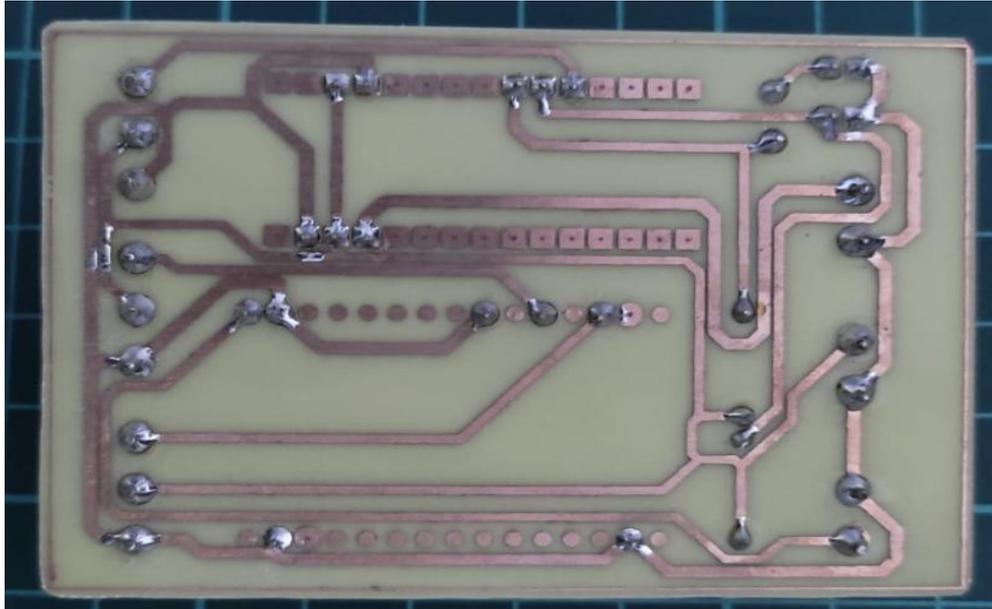
PCB cara superior con componentes electrónicos



Nota. La imagen muestra la Placa de circuito electrónico con sus componentes

Figura 36.

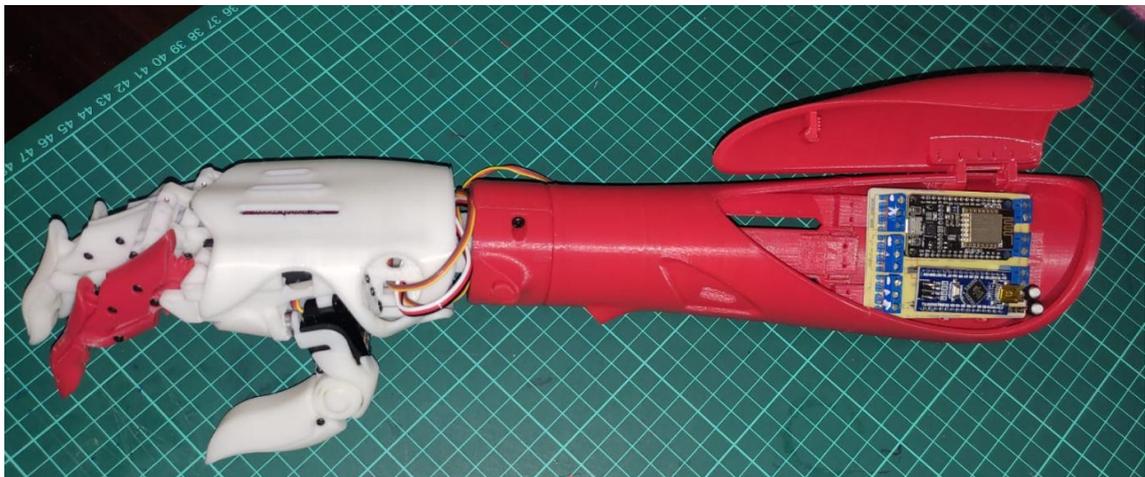
PCB cara inferior



Nota. La imagen muestra la Placa de circuito impreso con sus componentes soldados

Figura 37.

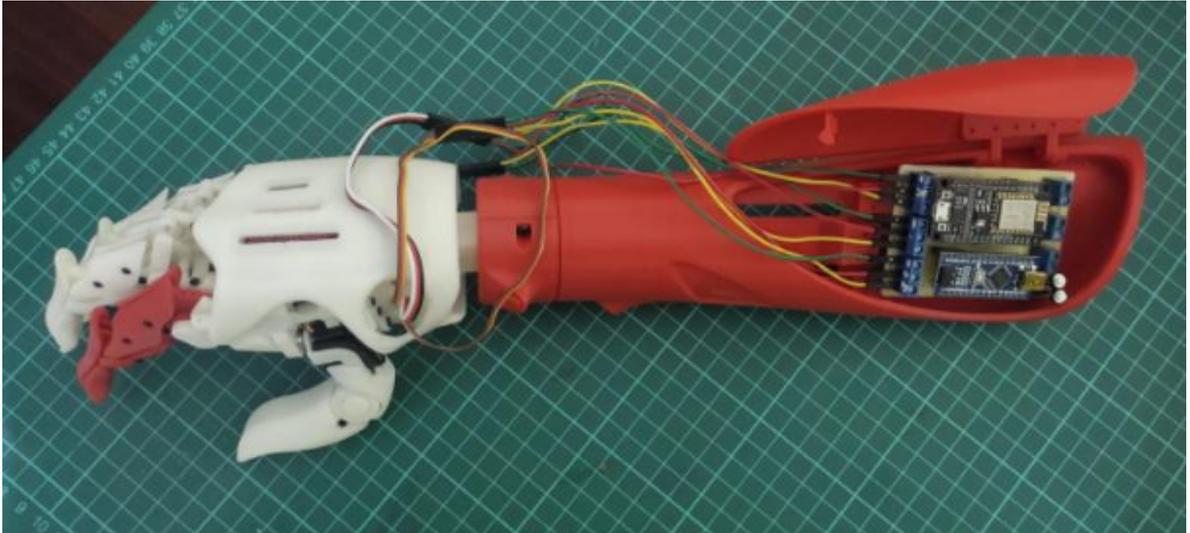
Prótesis completa con PCB



Nota. La imagen muestra la instalación la Placa de circuito impreso en la prótesis

Figura 38.

Prótesis completa con PCB



Nota. La imagen muestra las conexiones la Placa de circuito impreso con los servomotores

c. Estrategias y/o técnicas

La elaboración de la prótesis de articulaciones interfalángicas se procedió con la metodología con enfoque cuantitativo ya que tiene como propósito diseñar un prototipo de prótesis en personas sometidas a una amputación de dedos de la mano, se observarán los fenómenos tal y como se den en su contexto natural, para después analizarlos para llegar al objetivo o propósito del presente proyecto.

Como una de las técnicas usadas para la elaboración del proyecto fue revisar, y resumir documentos y archivos relacionados con el tema de investigación escogido.

Descriptivo: el presente estudio es de carácter descriptivo ya que permite analizar y entender con detalle la problemática que genera una amputación en el individuo y su adaptación a la sociedad.

Documental: se revisará, analizará y sistematizará documentos y archivos referentes al presente tema de investigación.

Experimental: se determinará el efecto posterior en un amputado al diseñar un prototipo de prótesis que se adapte a sus necesidades.

Al realizar una revisión documental en el diseño de la prótesis en documentos como , tesis de maestría e ingenierías, artículos científicos, videos de prótesis elaboradas con manufactura aditiva, fotos de diferentes diseños de prótesis.

Luego de esto se realizó un análisis de la información considerando la funcionalidad y adaptabilidad de la prótesis a diseñar se adoptó como alternativa la prótesis desarrollada por la empresa Exii que pone a disposición el diseño y los planos para su construcción y pueda realizarse mejoras por la comunidad o personas que lo necesiten, ya que en comparación a una prótesis profesional el valor de la misma disminuye considerablemente usando impresión aditiva 3D y cumple con los objetivos de nuestro proyecto.

Ya establecido el modelo de prótesis se procedió a la laminación de todas las partes, la impresión en 3D, ensamblaje y la configuración de los diferentes programas que intervienen en la comunicación como son el arranque del broker mosquitto, la inicialización del node-red así como loguearse en programa EMOTIV así como la conexión de los diferentes elementos electrónicos que forman parte de la prótesis

2.3 Validación de la propuesta

La siguiente tabla presenta información detallada de los actores seleccionados para la validación del modelo.

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Miriam García Sánchez	20 años	Tecnólogo Médico especialista en terapia ocupacional	Líder del servicio de Rehabilitación y Terapia Física del Hospital Luis Gabriel Dávila
Zamora Albuja Sandra Elizabeth	11 años	Licenciada en Terapia Física Médica	Fisioterapeuta del Hospital Luis Gabriel Dávila
Rómulo Ilvay Taday	10 años	Ingeniero en Electrónica	Analista electrónico en Celec EP Termopichincha

Datos del validador.

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Miriam García Sánchez	20 años	Tecnólogo Médico especialista en terapia ocupacional	Líder del servicio de Rehabilitación y Terapia Física del Hospital Luis Gabriel Dávila

Criterios de evaluación

Criterios	Descripción
Impacto	En el área de rehabilitación del país ya sean particulares o públicos puede ser un gran aporte para personas que acudan a estos centros para poder adquirir una prótesis para miembro superior y usarla en las actividades diarias para mejorar la calidad de vida .
Aplicabilidad	Se aplica a pacientes que hayan sufrido la pérdida de miembros superiores o tengan problemas sensoriales.
Conceptualización	Los elementos de la propuesta manejan conceptos en cuanto a pérdida de miembros superiores y manejo de señales encefalográficas
Actualidad	En el proyecto se usan tecnologías de vanguardia.
Calidad Técnica	La prótesis presenta calidad en sus detalles, estética en su diseño y tecnología de vanguardia
Factibilidad	Se podría aplicar a personas que tengan un miembro superior amputado con ayuda de personal de rehabilitación para dar seguimiento en las

actividades diarias que requieran el uso de la prótesis .

Pertinentes Ofrecen a los pacientes y a los profesionales médicos una ventaja significativa en el momento de la aplicación.

Escala de evaluación

Criterios	EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Deacuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad Técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

Datos del validador.

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Zamora Albuja Sandra Elizabeth	11 años	Licenciada en Terapia Física Médica	Fisioterapeuta del Hospital Luis Gabriel Dávila

Escala de evaluación

Criterios	EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Deacuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad Técnica					X
Factibilidad					X

Pertinencia

X

Datos del validador.

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Rómulo Ilvay Taday	10 años	Ingeniero Electrónico	Analista electrónico en Celec EP Termopichincha

Escala de evaluación

Criterios	EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Deacuerdo
Impacto					X

Aplicabilidad	X
Conceptualización	X
Actualidad	X
Calidad Técnica	X
Factibilidad	X
Pertinencia	X

2.4 Matriz de articulación de la propuesta

En la presente matriz se sintetiza la articulación del producto realizado con los sustentos teóricos, metodológicos, estratégicos-técnicos y tecnológicos empleados.

Matriz de articulación

Ejes o partes principales del proyecto		Breve descripción de los resultados de cada parte	Sustento teórico que se aplicó en la construcción del proyecto	Metodologías, herramientas técnicas y tecnológicas que se emplearon
1	Definición: de los elementos electrónicos, de control de aplicación de programación, de comunicaciones, variables de entrada a monitorear, variables de salida a controlar, partes y piezas etc.	1.1 Tomas de decisiones en base a funcionalidades y beneficios.	Programación Comunicaciones Inalámbricas Manufactura Aditiva, impresión 3D	
2	Diseño: de esquemas electrónicos, esquemas de control, aplicación, programación	2.1. Tarjeta electrónica basada en ESP8266 Y Arduino nano 2.2. Circuito electrónico 2.3. Comunicación MQTT 2.4 Proteus para el diseño del esquema y de la placa electrónica	Programación de ESP8266 Y Arduino nano Conexión entre la Diadema Emotiv y el software de Entrenamiento Emotiv BCI Comunicación MQTT para publicar y suscribir mensajes para activar la prótesis vía wifi a través del circuito ESP8266. Diseño de circuitos electrónicos (Proteus)	Software Arduino Software Emotiv BCI Software Node-Red Software Mosquitto Software Proteus
3	Impresión y laminado de partes y piezas de la prótesis,	3.1. Piezas impresas en 3D 3.2. Armado ensamblaje de la prótesis.	Impresión de las partes que conforman la prótesis de la empresa exii de Japón usando los archivos stl con la ayuda de SimpliFy3D y Fusion 360 Impresión 3D en material PLA + de articulaciones de la prótesis	Software de laminado SimpliFy3D Software de diseño Fusión 360

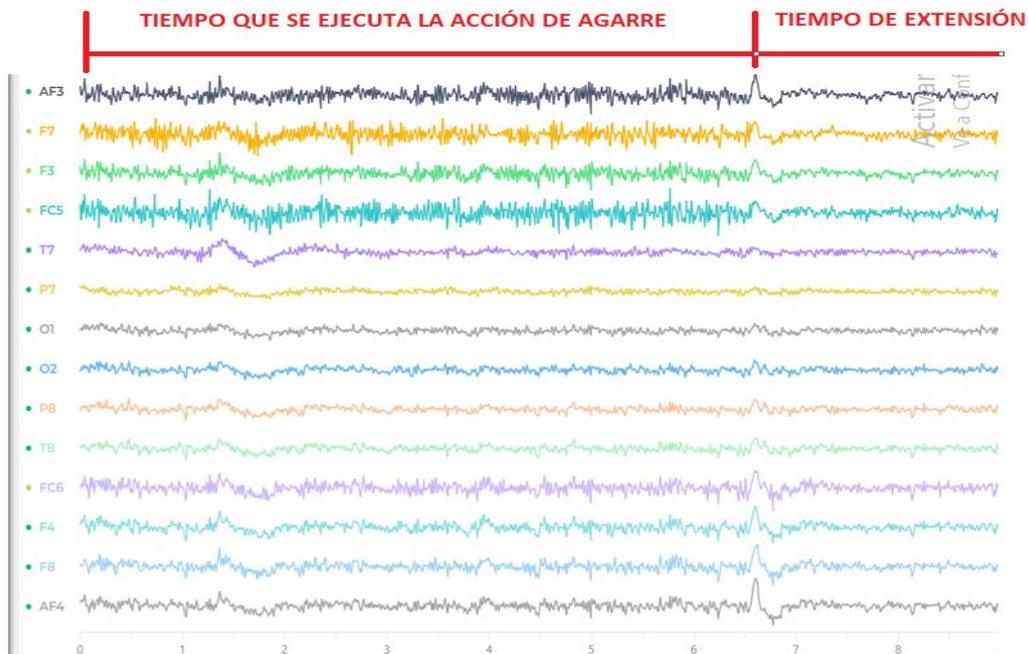
4	Implementación: cableado, sistemas electromecánicos, de control	4.1. Verificación de comunicación 4.2. Control de servomotores.	Revisión en programa node-red la recepción de datos emitidos por el auricular EMOTIV EPOC X Control por programación a través del circuito ESP8266 como del Arduino nano	Construcción y ensamblaje de la prótesis a través de la guía de la empresa exii
5	Pruebas: Movimiento de agarre y extensión	5.1 Prótesis	Funcionamiento de las articulaciones de la prótesis. Dedo Pulgar mediante dos pulsadores Dedo índice mediante el auricular EMOTIV EPOC X a través del comando mental entrenado PUSH Conjunto de los dedos medio, anular y meñique mediante el auricular EMOTIV EPOC X a través del comando mental entrenado PUSH	Observación del funcionamiento de agarre y extensión de un objeto de prueba (Pelota de poliuretano) y objeto cilíndrico (botella)

2.5 Análisis de resultados. Presentación y discusión.

Se probó el funcionamiento de la prótesis en su funcionalidad mediante el auricular o BCI Emotiv Epoc X, para la acción de agarre y extensión a un objeto esférico y cilíndrico, para nuestra prueba se usó una pelota de espuma de poliuretano y una botella, en el momento de la acción de agarre las señales eléctricas AF3, F7, F3, FC5 que corresponden al hemisferio izquierdo del cerebro, cambian su amplitud tomando como referencia el espacio entre cada señal de $200\mu\text{V}$, la amplitud mínima de $100\mu\text{V}$, y la amplitud máxima de $100\mu\text{V}$ como se observa en la figura 39. Se puede verificar que el tiempo que dura el agarre de la pelota de poliuretano es de aproximadamente 6 segundos luego de esto se regresa al estado neutral cambiando la amplitud de las señales eléctricas cercanas a $0\mu\text{V}$ y por ende la prótesis regresa a su estado de extensión.

Figura 39.

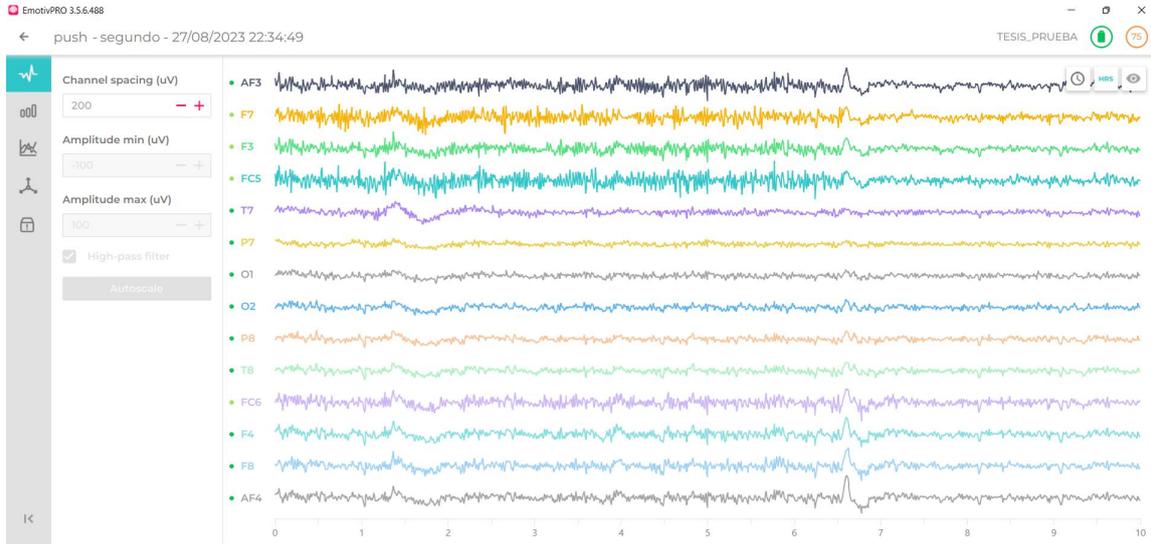
Electroencefalograma (EEG) registrado con el comando mental entrenado al momento de la acción de agarre



Nota. La imagen muestra el cambio de amplitud de las señales eléctricas del hemisferio izquierdo y derecho del cerebro durante 6 segundos

Figura 40.

Electroencefalograma (EEG) registrado en el segundo intento de agarre

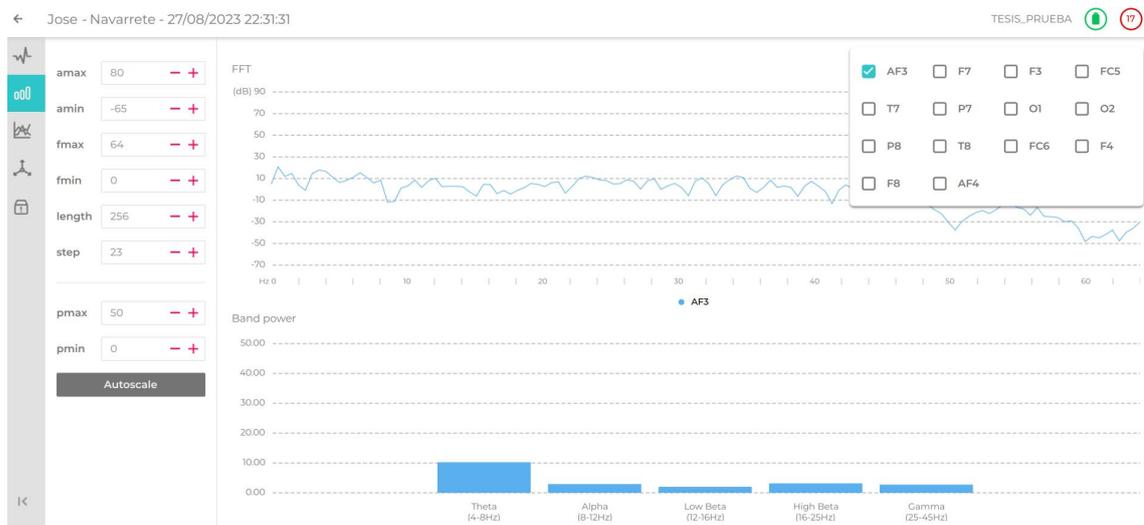


Nota. La imagen muestra el cambio de amplitud de las señales eléctricas del hemisferio izquierdo y derecho del cerebro en el programa EMOTIV BCI

También se registra cambios en las ondas cerebrales en particular en la onda Theta, al momento de la acción de agarre, con un valor de $10\mu\text{V}$ como se observa en la figura 38

Figura 41.

Registro de potencia de ondas cerebrales



Nota. La imagen muestra el valor de $10\mu\text{V}$ para la onda Theta

Figura 42.

Electroencefalograma (EEG) registrado en el tercer intento de agarre

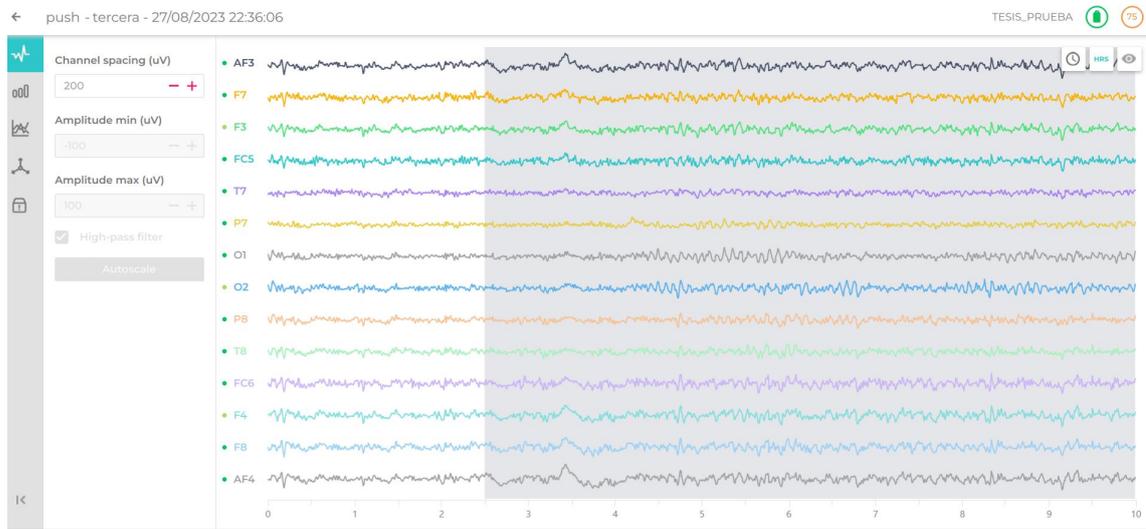
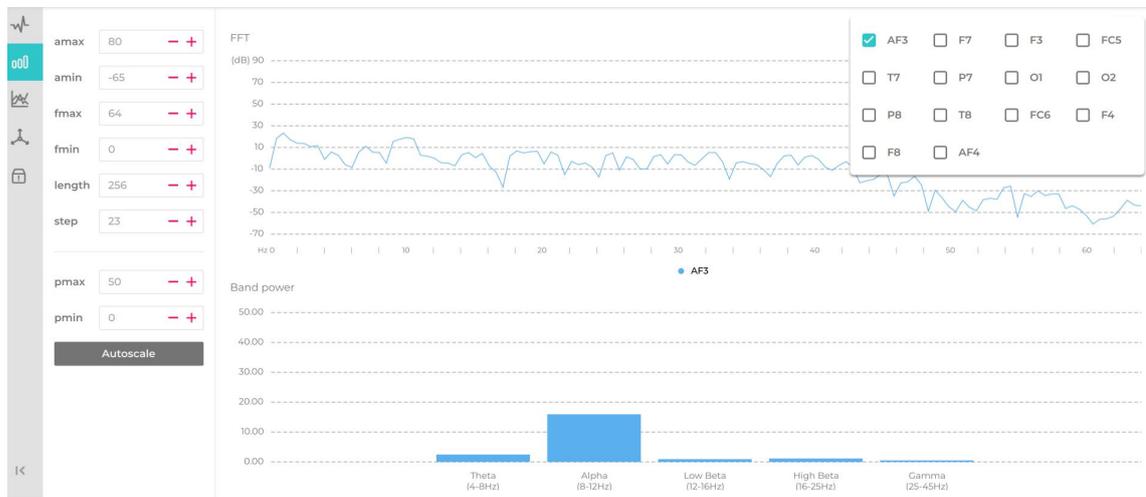


Figura 43.

Registro de potencia de ondas cerebrales



Nota. La imagen muestra el valor de $20\mu\text{V}$ para la onda Alpha.

Con estos resultados la prótesis cumplió con el objetivo de realizar la acción de agarre y extensión para diferentes objetos de prueba, se probó que su funcionalidad biomecánica del miembro superior para diferentes actividades que pueden ser desarrolladas para una persona que tenga el miembro superior amputado, donde la mano es el órgano principal de esta prótesis, esto ayudará en mejorar la calidad de vida de la persona.

El presente proyecto de investigación se lo realizó en la ciudad de Tulcán, en el Área de Fisioterapia del Hospital Luis Gabriel Dávila, donde se validó con personal del área el funcionamiento de agarre y extensión de la prótesis , y en la Universidad Tecnológica Israel, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Máster en Electrónica y Automatización.

CONCLUSIONES

- Mediante la impresión 3D se desarrolló un modelo de prótesis de mano con sus respectivas articulaciones.
- Al utilizar el proceso de la impresión 3D para el diseño de una prótesis, se reduce tiempos e inversión con relación a otras prótesis con similares características y fabricadas con diferentes materiales.
- La prótesis obtenida resulta funcional, ya que realiza una de las funciones principales de la mano del ser humano que es la de manipulación.
- Se realizó la interfaz del auricular Emotiv Epoc X y la prótesis, a través del circuito integrado ESP8266 y un Arduino nano, para el movimiento mecánico se usaron dos servomotores que activan de manera individual el dedo índice y el otro servomotor activa los dedos medio anular y meñique conjuntamente , adicional un tercer servomotor activa manualmente a través de dos pulsadores el dedo pulgar para los movimientos de ponencia característico de este dedo.

- Para este proyecto se entrenó los comandos mentales para alejar un cubo y mantenerlo en reposo a un cubo, esto se considera como comando mental PUSH y comando NEUTRAL proporcionado en el programa Emotiv BCI el cual dispone de la interfaz gráfica para realizar la acción de empujar y retornarlo a la posición inicial al cubo de entrenamiento

Los resultados del entrenamiento el programa EMOTIV BCI califica cada intento de entrenamiento como exitoso o no exitoso de acuerdo a las señales equivalentes que se activan en el cerebro considerando el mapa mental mientras más alejadas se encuentren la señales el comando es más efectivo, observando que el cubo se alejaba mientras el comando mental entrenado sea de mayor intensidad como el comando neutral, en nuestro caso se realizó 24 repeticiones para el entrenamiento del comando mental PUSH obteniendo resultados positivos para la interacción con la prótesis y ejecutar el agarre y extensión de las articulaciones interfalángicas de la prótesis.

- Las pruebas de agarre y extensión realizadas mediante objetos de prueba como una pelota y una botella, resultaron exitosas, ya que al mantener la señal de comando mental PUSH se obtiene el agarre del objeto pelota hasta que el estado mental sea neutro y se procedió a soltar la pelota.
- Podemos concluir que este trabajo cumplió con su objetivo desarrollar una prótesis de articulaciones interfalángicas controladas mediante interfaz BCI, funcional para

realizar la acción de agarre y extensión con diferentes objetos dando como resultado que la prótesis actúa de manera eficaz y sobre todo funcional para actividades básicas de la vida diaria.

RECOMENDACIONES

- Al realizar la impresión de la prótesis se deben escoger parámetros adecuados en la configuración de la impresora para obtener mejor calidad en las diferentes partes que componen la prótesis.
- Para el proceso de la impresión 3D de una prótesis en la actualidad ya existen materiales más resistentes y ligeros como el usado en este proyecto, que facilitan las actividades cotidianas que se requiera mayor fuerza de sujeción.
- Tener acceso a internet en la computadora para poder comunicar la interfaz BCI con la prótesis que contiene en su electrónica el circuito ESP8266, para obtener datos de las señales emitidas por el auricular y establecer la interfaz.
- Antes de usar el auricular Emotiv EPOC X hidratar los electrodos para que el usuario que lo va utilizar, obtenga un rendimiento tanto en el entrenamiento de los comandos mentales como la acción de agarre y extensión de la prótesis.
- El usuario que realiza las pruebas de agarre y extensión requiere, estar en un estado de concentración para ejecutar los comandos mentales antes entrenados como PUSH y NEUTRAL, para así poder ejecutar los movimientos de agarre y extensión de manera exitosa.
- En la actualidad existen diferentes empresas desarrollando BCI con mejores prestaciones, tanto en el desarrollo tecnológico como en la estética que se podrían usar para la aplicación que se ha desarrollado como es la implementación de una prótesis para la interacción de las actividades cotidianas dentro de la sociedad y mejorar la calidad de vida.

BIBLIOGRAFÍA

- Ali, H., Popescu, D., Hadar, A., Vasileanu, A., Popa, R., Goga, N., & Hussam. (2021). EEG-based Brain Computer Interface Prosthetic Hand. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12, 44-49. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120905>
- Arias, L. (2012). *Biomecánica y Patrones Funcionales de la Mano*.
- Artieda, J. (2012). *Ritmos Cerebrales, Complejidad Y Consciencia. Servicio de Neurofisiología Clínica de la Clínica Universidad de Navarra. Pamplona. . Grupo Ciencia, Razón Y Fé.*
- Beyrouthy, T., Al Kork, S. K., Korbane, J. A., & Abdulmonem, A. (2016). EEG Mind controlled Smart Prosthetic Arm. *2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech)*, 404-409. <https://doi.org/10.1109/EmergiTech.2016.7737375>
- Bright, D., Nair, A., Salvekar, D., & Bhisikar, S. (2016). EEG-based brain controlled prosthetic arm. *2016 Conference on Advances in Signal Processing (CASP)*, 479-483. <https://doi.org/10.1109/CASP.2016.7746219>
- Burger, H. (2009). *Amputación Parcial de la Mano, Trabajo, Discapacidad y Rehabilitación*.
- Cardona, C. (2011). Prevalencia alteraciones sensitivas.
- Chen, P. (2013). *Patrones de Fuerza Alterados Funcionalmente y Tareas de Agarre en Dedos en Gatillo*.
- Chinbat, O., & Lin, J.-S. (2018). *Prosthetic Arm Control by Human Brain*. <https://doi.org/10.1109/IS3C.2018.00022>
- Correa, K., & Vivas, A. (2016). *Prótesis de Mano Virtual Movida por Señales Encefalográficas* .
- Discapacidades, C. N. (2021). *Discapacidad Física*.
- Donoso, P. (2007). *Kinesiología Básica y Kinesiología Aplicada*. Edimec.
- Elstob, D., & Secco, E. (20016). A Low Cost EegBased Bci Prosthetic Using Motor Imagery. *International Journal of Information Technology Convergence and Services*, VI, 23-26. <https://doi.org/10.5121/ijitc.2016.6103>
- Galán, R., & Vergara, M. (2019). *Prótesis impresa en 3D para la rehabilitación de amputaciones digitales*.

- Honrubia, M. (2014). *La impresión 3D y sus usos en la industria de la construcción*.
<https://www.ennomotive.com/es/impresion-3d-en-construccion/>
- Lamande, F. (2014). *Amputación de Miembro Superior*. Elsevier Masson SAS.
- López, G. (2017). *Sistema Internacional 10/20. Manual De Posicionamiento De Electrodo*s.
- López, L., & Estrada, R. (2009). *Recuperación Ocupacional de las Amputaciones Traumáticas en Dedos de la Mano por Accidente de Trabajo*.
- Parth, L., Karan, C., Maulik, C., & Harshal, P. (2020). DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL ROBOTIC ARM BASED. *Multidisciplinary International Research Journal of Gujarat Technological University*, 2.
- Ramos-Argüelles, F., Morales, G., Egozcue, S., Pabón, R., & Alonso. (2009). *Técnicas básicas de encefalografías*.
- Salud, O. M. (2010). *Normas de Ortoprotésicas*.
- Sánchez, P. (2018). Sistema Inteligente para Rehabilitación de Extremidades Superiores mediante Sensores Electromiográficos. Ambato, Ecuador.
- Staffa, M., Giordano, M., & Ficuciello, F. (2020). A WiSARD Network Approach for a BCI-Based Robotic Prosthetic Control. *International Journal of Social Robotics*, 12.
<https://doi.org/10.1007/s12369-019-00576-1>
- Fox, S. (2017). Sistema nervioso. neuronas y sinapsis. *Fisiología humana*, 14e. McGraw Hill.
<https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=2163§ionid=162708807>
- Tânase, G. C. (2016). *3D Printing - New Industrial Revolution*.
- Toapanta, C. (2018). *DESARROLLO DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA CONTROLADO POR ONDAS CEREBRALES USANDO EL DISPOSITIVO NEUROSKY MINDWAVE MOBILE 2*.

ANEXOS

ANEXO 1

Programa en Arduino IDE para ser cargado en el ESP8266

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <Servo.h>
#include <OneWire.h>
Servo myservo;
Servo myservo2;

// Cambie las credenciales a continuación, para que su ESP8266 se conecte
a su enrutador
const char* ssid = "SandraJose";
const char* password = "419mateo0095";

// Cambia la variable a tu dirección IP de tu PC o Raspberry Pi, para
que se conecte a tu broker MQTT
const char* mqtt_server = "192.168.1.24";

// Inicializa espClient. Debe cambiar el nombre de espClient si tiene
varios ESP ejecutándose en un sistema de automatización
WiFiClient espClient22;
PubSubClient client(espClient22);

//Conecta tu NodeMCU a tu enrutador
void setup_wifi() {
  delay(10);

  Serial.println();

  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid);
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(100);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("");
  Serial.print("WiFi connected - NodeMCU IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

// Esta función se ejecuta cuando algún dispositivo publica un mensaje en
un tema al que está suscrito tu NodeMCU

void callback(String topic, byte* message, unsigned int length) {
  Serial.print("Message arrived on topic: ");
  Serial.print(topic);
  Serial.print(". Message: ");
  String messageInfo;

  for (int i = 0; i < length; i++) {

```

```

    Serial.print((char)message[i]);
    messageInfo += (char)message[i];
}
Serial.println();

// Si se recibe un mensaje en el tema new/topic, verifica si el mensaje
está encendido o apagado. Enciende la salida GPIO según el mensaje.
if(topic=="new/topic"){

    int resultado = messageInfo.toInt();
    int pos = map(resultado,65,0, 0 ,180);
    Serial.println(pos);
    myservo.write(pos);
    delay(1);

    int resultado1 = messageInfo.toInt();
    int pos1 = map(resultado1,65,0, 0 ,180);
    Serial.println(pos1);
    myservo2.write(pos1);
    delay(1);

}

}

// Esta función reconecta tu ESP8266 a tu broker MQTT
// Cambia la función a continuación si quieres suscribirte a más temas
con tu ESP8266
void reconnect() {
    // Loop until we're reconnected
    while (!client.connected()) {
        Serial.print("Attempting MQTT connection...");

        if (client.connect("ESP8266Client22")) {
            Serial.println("connected");
            //Suscribirse o volver a suscribirse a un tema
            // Puedes suscribirte a más temas
            client.subscribe("new/topic");
        } else {
            Serial.print("failed, rc=");
            Serial.print(client.state());
            Serial.println(" try again in 5 seconds");
            // Wait 5 seconds before retrying
            delay(5000);
        }
    }
}

// La función de configuración configura sus GPIO ESP en Salidas, inicia
la comunicación en serie a una velocidad de 115200 baudios

```

```

// Configura tu broker mqtt y configura la función de devolución de
llamada
// La función de devolución de llamada es la que recibe mensajes y
realmente controla la salida
void setup() {

  // pinMode(led, OUTPUT);
  Serial.begin(115200);
  myservo.attach(2);
  myservo2.attach(4);
  setup_wifi();
  client.setServer(mqtt_server, 1883);
  client.setCallback(callback);

}

// Para este proyecto, no necesitas cambiar nada en la función de bucle.
Básicamente, garantiza que NodeMCU esté conectado al corredor MQTT.
void loop() {

  if (!client.connected()) {
    reconnect();
  }
  if(!client.loop())
    client.connect("ESP8266Client22");

}

```

ANEXO 2

Programa en Arduino IDE para ser cargado en Arduino Nano

```

#include <Servo.h>

Servo mi_servo;

int grados = 90; // Inicializa en la posición 90°
int suma=6; // Botón para aumentar ángulo
int resta=7; // Botón para disminuir ángulo

void setup() {

    mi_servo.attach(8,750,1800); // Configura el Servo, 750ms = 0° y 1800
ms = 180°
    pinMode(suma, INPUT); // Configuramos pines de entrada
    pinMode(resta, INPUT);
    mi_servo.write(grados); // Muevo el motor hasta 90°

    //digitalWrite(suma,HIGH);
    // digitalWrite(resta,HIGH);
}

void loop() {

    if (digitalRead(suma) == LOW)
    {
        grados++; // Suma grados

        if (grados >= 180) // Proteje el motor, para que no exceda los 180°,
se puede dañar el motor
        {
            grados = 180;
        }
    }

    if (digitalRead(resta) == LOW)
    {
        grados--; // Resta grados
        if (grados <= 0)// Proteje el motor, para que no descienda de los 0°,
se puede dañar el motor
        {
            grados = 0;
        }
    }

    mi_servo.write(grados); // Escribo nuevo ángulo en grados

    delay(10);
}

```

ANEXO 3

**Imágenes de la prótesis en el área de terapia ocupacional del Hospital Luis Gabriel Dávila
de la Ciudad de Tulcán**

