

# **UNIVERSIDAD CATÓLICA BOLIVIANA “SAN PABLO”**

## **UNIDAD ACADÉMICA REGIONAL TARIJA**



### **INFORME DE PRÓTESIS TRANS RADIAL**

### **“PRÓTESIS PARA AMPUTACIONES TRANS RADIALES”**

**ESTUDIANTES:** Andres La Madrid y Santiago Torrico

**ASIGNATURA:** Diseño de Sistemas Biomédicos

**DOCENTE:** Ing Paulo Candía Goitia

Tarija-Bolivia

## Índice

1	Introducción .....	4
2	Antecedentes .....	4
3	Formulación del problema .....	4
4	Objetivos .....	5
4.1	Objetivo general .....	5
4.2	Objetivos Específicos .....	5
5	Marco teórico .....	7
5.1	Conceptos .....	7
5.2	Introducción a la Prótesis Biónica Transradial .....	9
5.3	Módulo y Señal Electromiográfica (EMG).....	9
5.4	Componentes Principales .....	11
6	Ingeniería del Proyecto .....	14
6.1	Funcionamiento. ....	14
6.2	Ventajas y Limitaciones. ....	14
6.2.1	Ventajas .....	14
6.2.2	Limitaciones. ....	15
6.3	Desafíos en el Desarrollo. ....	23
6.4	Innovaciones y Futuro de las Prótesis Biónicas .....	23
7	Metodología .....	24
7.1	Diseño CAD e impresión 3D .....	24
7.2	Electromiografía (EMG) .....	25
7.3	Control por MCU .....	25
8	Resultados .....	28
8.1	Costos .....	29
9	Conclusiones.....	29
10	Recomendaciones .....	30
11	Bibliografía.....	30
12	Anexos .....	32

## Capítulo I: Introducción

## **1 Introducción**

El desarrollo de prótesis para amputaciones ha avanzado significativamente en los últimos años transformando la calidad de vida de las personas con discapacidades. La amputación transradial, que se refiere a la pérdida de la extremidad distal del brazo, presenta desafíos únicos en términos de funcionalidad y estética. Las prótesis tradicionales a menudo carecen de la sensibilidad y el control necesario para realizar tareas cotidianas de manera efectiva. Sin embargo, la integración de tecnologías modernas, como los sensores de electromiografía (EMG) y sistemas de acción automática, ha abierto nuevas posibilidades en la rehabilitación y en el diseño de prótesis más funcionales.

## **2 Antecedentes**

La electromiografía es una técnica que mide la actividad eléctrica de los músculos. En el contexto de las prótesis, los sensores EMG pueden capturar las señales eléctricas generadas por los músculos residuales en el muñón de la amputación. Estas señales se utilizan para controlar el movimiento de la prótesis, permitiendo una interacción más intuitiva y natural entre el usuario y el dispositivo. Esto contrasta con las prótesis mecánicas tradicionales, que a menudo dependen de sistemas de control manual o de cables, limitando la agilidad y la respuesta.

Mirando el mercado actual, se pueden encontrar prótesis biónicas para amputaciones transradiales pueden variar ampliamente según la tecnología utilizada y el país de fabricación, los cuales las prótesis básicas cuestan en entre \$10,000 y \$20,000 USD, estas prótesis utilizan sensores mioeléctricos simples y ofrecen movimientos básicos de la mano y muñeca. Entre las prótesis avanzadas rondan entre \$20.000 y \$80.000 USD. Estas incluyen funciones avanzadas como movimientos independientes de los dedos, muñeca rotatoria y mejor precisión en el control gracias a sensores de última generación y finalmente las prótesis de alta gama o a medida, en casos personalizados con funciones avanzadas y materiales ligeros y duraderos, el costo puede superar los \$100,000 USD. Algunas de las más avanzadas también pueden tener integración de inteligencia artificial y aprendizaje adaptativo.

## **3 Formulación del problema**

¿Cómo mejorar la calidad de vida de las personas con amputaciones transradiales con una prótesis biónica, que integre sensores de electromiografía (EMG) y sistemas de control

automático con ayuda de un servomotor y mejorar la funcionalidad y la calidad de vida de los usuarios a un bajo precio a comparación del mercado actual?

## **4 Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Desarrollar e implementar una prótesis funcional para amputaciones transradiales que integre un sistema de control basado en señales de electromiografía (EMG) y mecanismos de acción automática, mejorando así la usabilidad y la calidad de vida del usuario a un bajo costo de fabricación.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- Crear un diseño ergonómico que se adapte al muñón del usuario, utilizando materiales ligeros, resistentes y de bajo costo que maximicen la comodidad y la funcionalidad.
- Implementar un sistema con un sensor EMG que capte las señales eléctricas de los músculos residuales, permitiendo el control intuitivo de la prótesis.
- Diseñar e implementar códigos de programación que interpreten las señales EMG y traduzcan la intención del usuario en movimientos de la prótesis.
- Desarrollar un sistema que permita la ejecución automática de movimientos predefinidos basados en patrones de actividad muscular, mejorando la funcionalidad de la prótesis.
- Evaluar el rendimiento de la prótesis mediante pruebas con usuarios, recopilando datos sobre la efectividad del control EMG y la satisfacción del usuario.
- Ajustar y mejorar el diseño y la funcionalidad de la prótesis en base a la retroalimentación obtenida durante las pruebas de usabilidad, garantizando una adaptación continua a las necesidades del usuario

## Capítulo II: Marco teórico

## 5 Marco teórico

Para poder comprender el desarrollo, funcionamiento e implementación del proyecto a continuación, es necesario primero definir algunos conceptos, componentes, herramientas y programas relacionados que se usaron a lo largo del desarrollo de la prótesis.

### 5.1 Conceptos

#### - Placa de desarrollo Arduino

Arduino es una plataforma de desarrollo de hardware y software de código abierto que permite a los usuarios diseñar y crear proyectos electrónicos. Incluye placas electrónicas programables y un entorno de desarrollo integrado (IDE) para escribir, compilar y cargar programas en las placas. Es ampliamente utilizado en proyectos educativos, prototipos, robótica y automatización, debido a su accesibilidad, versatilidad y facilidad de uso.

Existen diversas placas Arduino, con características diferentes cada uno, los más usados en entornos educativos, desarrollo de prototipos, automatización y robótica básica son:

**Arduino Uno:** Es un microcontrolador basado en el chip ATmega328P, diseñado para facilitar el desarrollo de proyectos de electrónica y programación. Su diseño es ideal para principiantes por su simplicidad y versatilidad, pero también es lo suficientemente potente para proyectos un poco más avanzados.

**Arduino Mega:** Es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560, diseñada para proyectos complejos que requieren un mayor número de pines tanto de entrada como de salida, además de memoria que otros modelos como el Arduino Uno o el Nano. Es ideal para aplicaciones avanzadas como robots grandes, impresoras 3D, sistemas de automatización y proyectos con múltiples sensores.

**Arduino Nano:** Es una placa de microcontrolador compacta y versátil basada en el ATmega328P. Es una versión más pequeña y económica del Arduino Uno, diseñada para proyectos donde el tamaño reducido es crucial.

#### - Arduino IDE.

Arduino IDE (Integrated Development Environment) es el entorno de desarrollo oficial para programar y trabajar con placas Arduino. Es una herramienta gratuita y de código abierto que permite escribir, compilar y cargar código en las placas de desarrollo de Arduino.

Permite agregar, eliminar, actualizar y descargar bibliotecas que amplían y mejoran las capacidades de la placa Arduino como manejar sensores, motores, pantallas, etc. También este software tiene el monitor serial, que permite establecer una comunicación en tiempo real entre la computadora y la placa Arduino a través del puerto serie. Se puede enviar ordenes o datos desde la computadora al Arduino para controlar su comportamiento y además muestra la información que el Arduino envía, como valores de sensores, mensajes de depuración o estados del sistema.

#### - **Servomotor**

Un servomotor es un motor eléctrico que permite un control preciso de la posición con ayuda de un encoder que se encarga de censar constantemente el ángulo actual con el deseado, una vez llegue y los ángulos coincidan el motor se detiene y espera la siguiente instrucción, como también se puede variar o modificar su velocidad y aceleración. Se usan en sistemas que requieren movimientos exactos, como robots, prótesis, máquinas CNC y automatización de procesos.

Existen los servomotores de 5V que están diseñados para funcionar con un voltaje de alimentación de 5 voltios, ideal para proyectos de electrónica de baja potencia y control con microcontroladores como Arduino. Estos servos son ampliamente utilizados debido a su compatibilidad con sistemas de control de 5V y su facilidad de integración en aplicaciones como robótica, automatización y prototipado.

Dentro de los servomotores de 5V hay subtipos de estos, los principales y más usados son los micro servomotores que son pequeños y versátiles para aplicaciones básicas o sencillas, pero su desventaja es que no tienen mucho torque o fuerza para aplicaciones más exigentes donde se requiera mover cargas más pesadas, se clasifican mayormente en sus grados de rotación, que pueden ser 360 o 180 grados.

Después tenemos los servomotores que de igual manera que los micro servomotores, funcionan a 5V en su gran mayoría, éstos se caracterizan por su nivel de fuerza que pueden entregar y eso se reflejará también en su tamaño, ya que son más grandes y robustos.



Dependiendo el modelo, se clasifican en su grado de rotación. Ya que pueden ser de 360 o 180 grados, como también de giro continuo, es decir que no tienen límite de movimiento o grados de rotación, si no que girarán continuamente sin parar a menos que se programe por código para que se detengan.

## **5.2 Introducción a la Prótesis Biónica Transradial**

Las prótesis biónicas para amputaciones transradiales representan una de las soluciones tecnológicamente más avanzadas para personas con amputación a nivel del antebrazo. Estas prótesis buscan imitar las funciones básicas de la mano, como el agarre y la manipulación de objetos, utilizando componentes electrónicos que procesan las señales musculares residuales en el brazo del usuario para controlar el movimiento de la prótesis.

## **5.3 Módulo y Señal Electromiográfica (EMG)**

La electromiografía (EMG) es una técnica que registra y analiza la actividad eléctrica producida por los músculos esqueléticos durante su activación. Este principio es fundamental en las prótesis biónicas, ya que permite captar y traducir las intenciones de movimiento del usuario, a través de la actividad eléctrica generada en los músculos remanentes del antebrazo.

- **Captura de Señales:** Los sensores EMG capturan la señal eléctrica generada al contraer los músculos.
- **Procesamiento de la Señal:** La señal se filtra y amplifica para mejorar su claridad y separar el ruido.
- **Entrada de la señal:** La señal de salida del controlador EMG irá como entrada a un pin analógico del controlador y en base a las lecturas que reciba hará acciones determinadas.
- **Control del Movimiento:** Mediante el procesamiento de la señal EMG, el microcontrolador interpreta la contracción muscular mediante códigos de programación y ajusta el movimiento del servomotor para realizar el cierre o apertura de la prótesis.

Un módulo EMG es un dispositivo diseñado para medir y procesar señales eléctricas generadas por la actividad muscular. Este tipo de módulos es útil en aplicaciones como prótesis biónicas, interfaces hombre-máquina y estudios biomédicos.

La señal EMG es susceptible al ruido, por eso la mayoría de los módulos integran filtros pasa bajos, pasa altos y filtros notch para eliminar estas interferencias. La calidad del filtrado afecta directamente la utilidad de la señal. Un buen módulo debe filtrar ruido sin eliminar componentes esenciales de la señal EMG.

Los módulos bien diseñados ofrecen lecturas estables, incluso en condiciones de uso prolongado. Además, su compacto diseño los hace versátiles y convenientes en diseños donde se tenga un espacio reducido y se requieran un circuito compacto.

Es importante resaltar que se debe calibrar el sensor EMG, ya que la señal de salida puede llegar a 9 voltios

#### - **Filamento de impresión PLA**

El filamento PLA (Ácido Poliláctico) es uno de los filamentos más usados en la impresión 3D, tanto para principiantes como para usuarios avanzados, se utiliza mucho debido a su facilidad de uso y sus propiedades mecánicas.

El PLA es rígido pero quebradizo y comienza a deformarse a partir de los 60 o 65°C, lo que lo hace menos adecuado para aplicaciones que estén expuestas a altas temperaturas. Tiene una amplia disponibilidad ya que se vienen en distintos colores y mezclas, incluso con efectos como brillos, transparencias o mezclas con fibras de madera, metal, etc. y funciona con la mayoría de las impresoras 3D del mercado.

Si bien existen otros tipos de filamentos como el ABS o el PETG, el PLA es más fácil de imprimir debido a su menor tendencia a la deformación y no requiere cama caliente, aunque puede ser útil, mientras que el ABS necesita temperaturas de cama altas como de 80 a 110 °C para evitar deformaciones.

Además, que el PLA tiene una contracción térmica baja, que es ideal para piezas grandes o con geometrías complejas, mientras que el ABS por su contracción, puede requerir un entorno cerrado y por último ofrece un acabado más brillante y suave, que es adecuado para proyectos estéticos o decorativos, mientras que el ABS tiende a un acabado mate y puede necesitar post procesamiento para un mejor acabado.

El filamento PETG es fácil de imprimir, puede producir hilos si no se controlan los ajustes, mientras el PLA es menos propenso a este problema, PLA es menos abrasivo que el PETG, lo que prolonga la vida útil de las boquillas y otros componentes de la impresora.

Por lo general el PLA suele ser más económico que el PETG, haciendo una opción más accesible para prototipos y diversas piezas.

#### - **Baterías**

Las baterías de 9V son una fuente de alimentación compacta y versátil que se usan en muchos tipos de aplicaciones electrónicas y dispositivos portátiles. Hay 3 tipos de baterías que son las más usadas en general como las alcalinas que son comúnmente usadas ya que tienen una mayor capacidad que las de carbón zinc. También están las recargables que ofrecen un ciclo de vida más largo y pueden reutilizarse y finalmente las de litio no recargable que ofrecen alta capacidad y un tiempo de duración más largo, éstas últimas 2 son de un precio más elevado que las comunes que no son recargables ni de alta durabilidad debido a sus características, además se debe tener en cuenta que en el caso de las recargables se debe comprar también el puerto de carga para las mismas.

Son convenientes en muchos casos ya que entregan 9V continuos y eso abre posibilidades de alimentar componentes que demanden un poco más de voltaje, como en el caso de los módulos EMG, donde se requiere justamente 9 voltios en configuración de fuente inversa, es decir que se requiere 2 baterías en configuración inversa.

Además, que su costo es accesible frente a baterías recargables de que entregan la misma cantidad de voltaje, pero como desventaja que no son recargables, es decir que se deberán cambiar periódicamente.

### **5.4 Componentes Principales**

- **Sensor EMG:** Es el dispositivo encargado de capturar la actividad electromiografía del músculo. Existen diferentes tipos de sensores EMG para prótesis, pero los más comunes utilizan electrodos de superficie.

- **Servomotor:** Este componente actúa como actuador, transformando la señal de control en movimiento mecánico. En una prótesis biónica transradial, el servomotor controla la apertura y el cierre de una garra que emula los movimientos de una mano humana.
- **Controlador:** Un microcontrolador, como un Arduino, es responsable de procesar la señal EMG y enviar las instrucciones adecuadas al servomotor. El controlador interpreta la intensidad de la señal para ajustar el ángulo de la garra, permitiendo diferentes niveles de cierre.
- **Baterías:** Las prótesis biónicas generalmente funcionan con baterías recargables que alimentan tanto el sensor EMG como el servomotor.
- **Filamento PLA:** La estructura física y externa está impresa en 3D con filamento PLA, siendo ligero, resistente y fácil de reemplazar.

#### Hilos tensores y flexores:

Los hilos tensores son elementos delgados y resistentes que generalmente son fabricados de materiales como polidioxanona (PDO), ácido poliláctico (PLA) o ácido poliglicólico (PGA), se utilizan principalmente en procedimientos médicos y estéticos para tensar y rejuvenecer tejidos, como la piel del rostro o del cuerpo. También pueden usarse en sistemas mecánicos y aplicaciones de ingeniería, donde se utilizan para transmitir fuerza o movimiento. Puede haber varios tipos de hilos tensores, variando su grosor y material, lo que se traducirá en su capacidad de tensión o estiramiento y aplicación de cargas.

Los hilos flexores son elementos que se utilizan para transmitir fuerza o movimiento, generalmente en sistemas mecánicos, robóticos o protésicos. Generalmente están asociados con el diseño y la funcionalidad de dispositivos como prótesis biónicas, manipuladores robóticos o sistemas de tensión, están diseñados para doblarse o estirarse en diferentes direcciones sin romperse, facilitando los movimientos suaves y naturales y están fabricados con materiales como nailon, acero recubierto o polímeros avanzados.

Pueden soportar fuerzas de tracción significativas, dependiendo del material, grosor y diseño.

## Capítulo III: Ingeniería del proyecto

## **6 Ingeniería del Proyecto.**

### **6.1 Funcionamiento.**

La prótesis utiliza la señal electromiográfica del usuario para controlar el movimiento de apertura y cierre de la garra.

**Detección de Contracción Muscular:** Cuando el usuario intenta cerrar la mano, el sensor EMG detecta la contracción de los músculos remanente o residuales que quedan en el antebrazo, usando electrodos EMG para dicha detección.

**Procesamiento de la Señal:** La señal captada es procesada por el microcontrolador, el cuál mediante programación comparará la intensidad de la señal captada para determinar si el movimiento es suficiente para accionar la garra.

**Accionamiento del Servomotor:** Dependiendo de la intensidad de la señal EMG, el controlador comparará dicha señal con un umbral o valor predefinido en la programación y si la señal cumple la condición entonces envía una señal al servomotor, que se acciona moviéndose 180 grados, tirando consigo hilos tensores conectados a la garra, haciendo que la mano impresa se cierre o abra, simulando el movimiento natural de una mano.

### **6.2 Ventajas y Limitaciones.**

#### **6.2.1 Ventajas**

- **Control Voluntario:** Permite al usuario tener control directo sobre los movimientos de la prótesis mediante contracciones musculares naturales.
- **Personalización:** Los parámetros de sensibilidad y el rango de movimiento pueden ajustarse a las necesidades específicas de cada usuario.
- **Mejora de la Funcionalidad:** Facilita la realización de tareas diarias y mejora la autonomía del usuario.
- **Mantenimiento y reemplazo:** Es de fácil mantenimiento o reemplazo de las piezas, como ser la impresión 3D del cuerpo de la prótesis o los módulos tanto del sensor EMG como del controlador.
- **Bajo Costo:** Los materiales, componentes y fabricación son de bajo costo a comparación de los que actualmente se encuentran en el mercado

### 6.2.2 Limitaciones.

- **Ruido en la Señal EMG:** La señal EMG puede ser afectada por interferencias externas, como el movimiento involuntario de otros músculos, falta de recubrimiento y aislante en el cable.
- **Consumo de energía:** La prótesis necesita recargarse regularmente con baterías, lo cual puede limitar su uso prolongado.
- **Movimientos limitados:** En este modelo desarrollado, solo se puede cerrar o abrir las garras, limitando movimientos específicos como girar la muñeca o accionar los dedos independientemente cada uno.
- **No apto para altos esfuerzos:** Si bien el material PLA es resistente, combinado con los ajustes de impresión para reforzar su robustez, la prótesis no es apta para trabajos, esfuerzos o cargas elevadas debido a que el material o el servomotor tenderían a fallar o ceder.

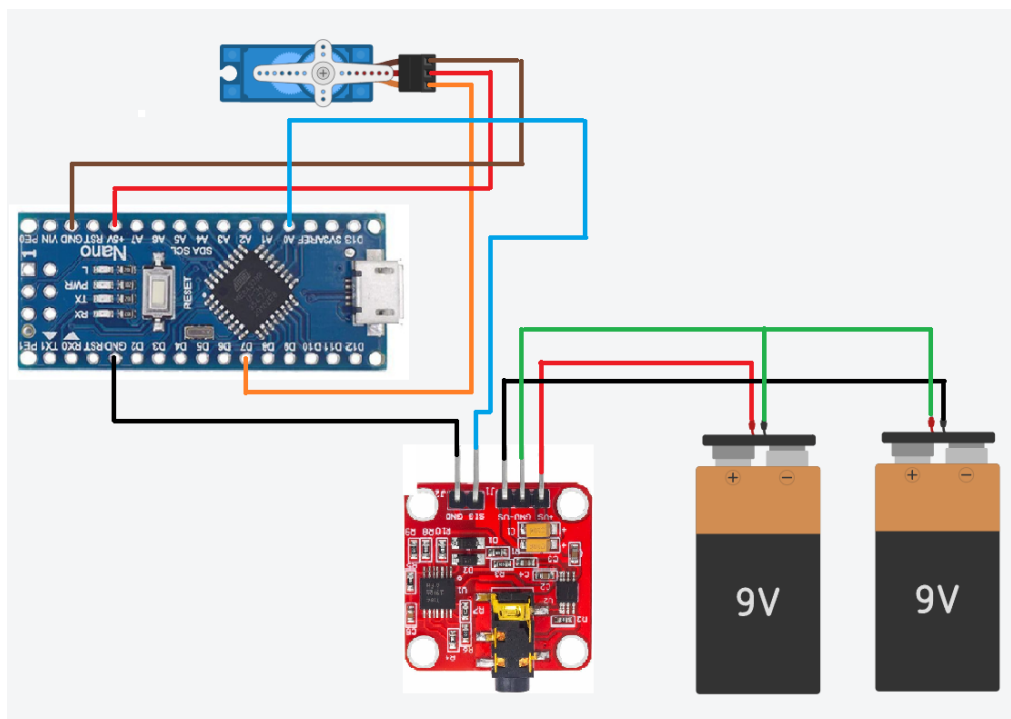
### **Conexión del microcontrolador al servomotor y módulo EMG**

Se debe conectar las baterías de 9V en configuración inversa para alimentar al módulo EMG, juntando un polo positivo de una batería y un polo negativo de la otra batería, lo cual sería GND, y los otros 2 bornes que quedan tanto positivo y negativo, van respectivamente al módulo

El módulo EMG cuenta con otros 2 pines que son la señal de salida (SIG) y GND, los cuales se deberán conectar a la placa Arduino, el pin de GND va conectado al pin de GND de la placa Arduino y la señal de salida del módulo EMG va a una entrada analógica del Arduino Nano.

El servomotor el cual tiene 3 cables de conexión, los cuales por lo general son de color café, rojo y amarillo, los cuales son de conexión GND, VCC y Señal de salida respectivamente. Puede haber variantes en el código de colores de los cables dependiendo el modelo y marca del servomotor. (*Consultar Anexo 1*)

El cable de GND (café) irá a un pin de GND de la placa Arduino, el cable de alimentación VCC (rojo) irá al pin de 5 voltios del controlador y finalmente, el cable de la señal de salida (amarillo) irá a un pin de entrada digital del Arduino Nano.



Fuente: *(Elaboración propia)*

### **Conexión de cable EMG a los músculos**

La conexión del cable para EMG con conector Jack de 3.5 milímetros va al puerto Jack hembra que se encuentra en el módulo EMG.

Finalmente, se acoplan electrodos EMG en los extremos de cada uno de los cables para EMG, el cable consta de 3 conexiones para electrodos, los cuales deben ir bien posicionados de manera correcta a los músculos del brazo.

Para identificar dónde colocar los electrodos, es recomendable seguir las normativas específicas que ofrecen indicaciones sobre su ubicación en múltiples zonas musculares diferentes. La finalidad de esta colocación es asegurar una posición estable que permita obtener una señal electromiográfica de calidad. Los electrodos pueden posicionarse sobre la piel tanto de manera longitudinal como transversal.

En la colocación longitudinal, se recomienda situar el electrodo bipolar en la zona central del músculo, es decir, entre la terminación de la neurona motora que transmite el impulso eléctrico (cercana a la línea media del músculo) y el tendón distal.



Para la colocación transversal, se sugiere ubicar el electrodo bipolar en la parte media del músculo, asegurándose de que la línea que conecta ambos electrodos esté alineada de forma paralela al eje longitudinal del músculo.

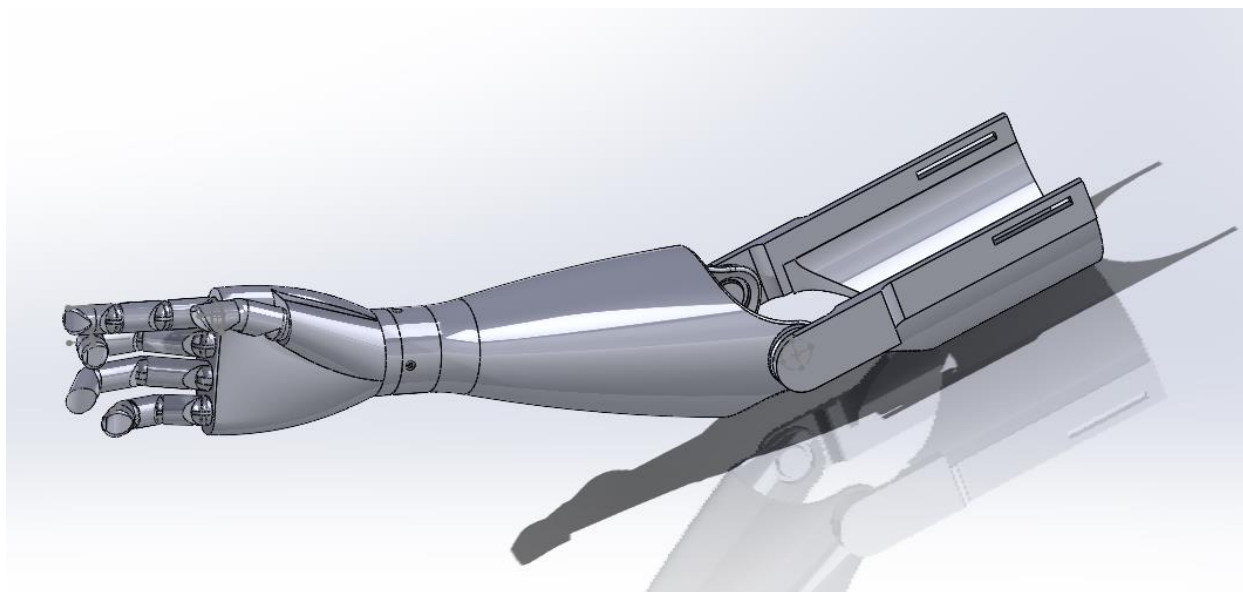
### **Diseño de la estructura**

Para el desarrollo del modelado de la estructura de la prótesis en sí, se optó realizarlo en el software SolidWorks.

SolidWorks es un software de diseño asistido por computadora (CAD) ampliamente utilizado en ingeniería, fabricación y diseño industrial y permite a los usuarios crear modelos en 2D y 3D de piezas, ensamblajes y dibujos técnicos con alta precisión y detalle, además ofrece un modelado paramétrico, lo que permite hacer cambios en cualquier parte del diseño y actualizar automáticamente los elementos relacionados.

Este software es excelente para generar archivos para su posterior fabricación como máquinas CNC, impresoras 3D y cortadoras láser. Frente a AutoCAD que, si bien es mejor para diseños en 2D, pero SolidWorks domina en modelado 3D paramétrico y simulaciones avanzadas.

Y mientras Fusion 360 es más económico y basado en la nube, no tan robusto en ensamblajes complejos ni tan optimizado para la industria pesada.



### Código de programación en Arduino IDE

Para el funcionamiento e interacción del controlador Arduino junto con el servomotor y el módulo EMG se necesita programar instrucciones para que el controlador de la placa Arduino sepa qué debe realizar con los datos que tiene como entrada, en este caso, la señal electromiográfica del EMG, y además debe mandar señales de control para sus actuadores de salida, como el servomotor.

```
#include <Servo.h>

#define THRESHOLD 75    // se ajusta y calibra el valor de Umbral de la señal EMG
#define EMG_PIN A0      // se define la entrada analógica
#define SERVO_PIN 3     // pin digital para servomotor

Servo servo1;           // Se define el servo como variable

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  servo1.attach(SERVO_PIN); // Asigna el pin 3 como el pin del servo
}

void loop()
{
  int value = analogRead(EMG_PIN); // Lee el valor del sensor EMG en el pin A0

  if (value > THRESHOLD) {
    servo1.write(170); // Si el valor del sensor supera el umbral, mueve el servo a 170°
  } else {
    servo1.write(0);   // Si no supera el umbral, mueve el servo a 0°
  }

  Serial.println(value); // Imprime el valor del sensor en el monitor serial
  delay(250);           // Espera 250 ms antes de la próxima lectura
}
```

*Fuente: Elaboración en Arduino IDE*

Primeramente, se importa la librería Servo.h que se utiliza para controlar servomotores, que es ideal donde se necesita precisión en el control de movimientos.

Después se definen los pines que se utilizarán en placa Arduino Nano, en este caso se usarán el pin A0 que es una entrada analógica para la lectura de señales del módulo EMG y el pin 3 que es se usa de entrada digital que pertenece a la señal del servomotor.

Se define el valor del Umbral que se tendrá, en este caso el valor es 75, si la señal supera este valor, el servomotor se moverá a un ángulo determinado y declarado más

adelante. Este valor variará según la aplicación y necesidad que se tenga para activar o controlar con ello distintos actuadores con la señal de salida que tenga el módulo EMG.

Se define al servomotor como una variable que representará al servomotor en el código.

Seguidamente se inicializa la comunicación serial para imprimir los valores del sensor EMG en el monitor serial con un valor de 9600 baudios.

`servo1.attach(SERVO_PIN);` asocia el objeto `servo1` al pin 3 del Arduino, lo que le permite controlar el servomotor conectado a ese pin.

`int value = analogRead(EMG_PIN);` lee el valor analógico de la señal EMG conectada al pin A0. Este valor es un número entre 0 y 1023.

Seguidamente declaramos una condición en bucle:

`if (value > THRESHOLD);` Si el valor leído del módulo EMG supera el umbral de 75, se ejecuta el bloque de código dentro de la condicional.

`servo1.write(170);` Se encarga de mover el servomotor a 170 grados si la señal es suficientemente fuerte, es decir, si la actividad muscular es alta, lo cual se traduciría a que el servomotor con su rotación estire los hilos tensores, haciendo que la palma se cierre.

`servo1.write(0);` Si la señal EMG no supera el umbral, el servomotor se mueve a 0 grados, es decir, en posición inicial, lo cual haría que la mano se abra por completo.

`Serial.println(value);` Imprime el valor de la señal EMG en el monitor serial para monitorizar dicha señal y depurarla.

`delay(250);` Hace una pausa de 250 milisegundos entre cada lectura del sensor, para evitar lecturas excesivas y permitir un comportamiento más estable.

### **Impresión 3D de la Estructura**

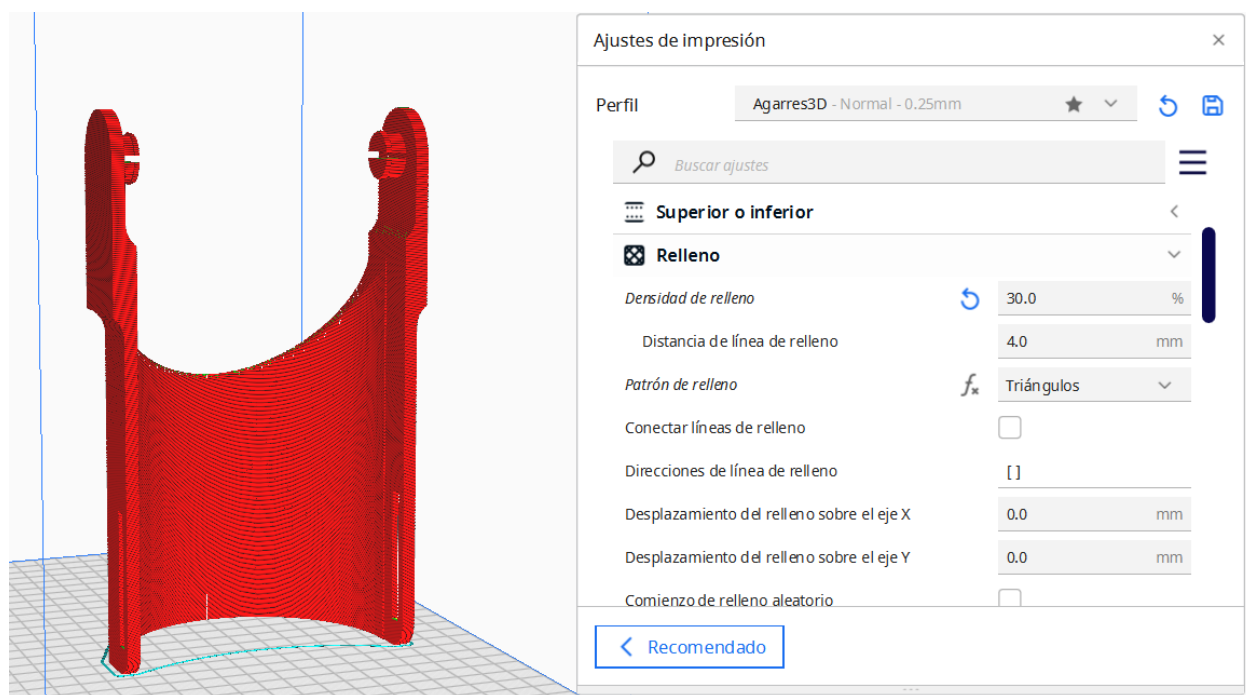
La impresión 3D en impresoras domésticas es un proceso accesible para fabricar objetos tridimensionales mediante la adición progresiva de capas de material, generalmente plástico. Este tipo de impresoras se caracterizan por su bajo costo, facilidad de uso y

capacidad para crear piezas personalizadas en diversos ámbitos, como educación, prototipado rápido y reparaciones caseras.

Sus ventajas se dejan notar como su accesibilidad económica ya que los precios han disminuido significativamente en comparación hace unos años cuando eran una novedad, permite fabricar prototipos y objetos personalizados sin necesidad de herramientas adicionales y pueden usar materiales diversos ya que utilizan filamentos comunes como PLA, ABS, PETG entre otros que son fáciles de adquirir.

Aunque su tamaño de impresión es uno de sus problemas ya que las impresoras domésticas tienen volúmenes de construcción limitados, esto ira variando de la marca y modelo en específico.

Otro de sus inconvenientes es su velocidad de impresión que pueden ser largos dependiendo del diseño y del modelo de impresora que se tenga a disposición. Además, que algunas piezas requieren lijado, pintura u otros ajustes para el acabado final.



Algunos de los datos mas importantes de la impresión son un 30% de relleno, para que no sea demasiado pesada, pero sea lo suficientemente solida para resistir movimientos bruscos, 4 capas

en las paredes laterales, superior e inferior, soporte de árbol, y una adherencia de tipo balsa para evitar que la pieza se despegue de la placa de impresión en las partes más altas de la pieza.

### Ensamble de la Prótesis

Al tener la estructura impresa, y el circuito funcionando correctamente, llega la hora de ensamblar todo en un diseño compacto y versátil, dando camino a la prótesis biónica.

Es importante saber que este proceso es delicado y se debe realizar con cuidado, ya que al manipular de mala manera los componentes tanto electrónicos como la estructura impresa, pueden llegar a dañarse o presentar fallas al momento de su funcionamiento.



*Pieza impresa de la carcasa del antebrazo.*



*Palma y dedos impresos en 3D, con hilos tensores y extensores.*



*Mano y antebrazo ensamblados.*



Brazo completo ensamblado en 3D.

### 6.3 Desafíos en el Desarrollo.

- Integración de Componentes: La precisión en la interpretación de las señales EMG y su traducción en movimientos suaves y precisos son fundamentales para un funcionamiento óptimo.
- Elección de Servomotor: Se necesitaba un servomotor con un torque elevado a comparación de los demás, debido a la fuerza requerida para sostener objetos con la garra, además de necesitar precisión en los ángulos.
- Comodidad y Adaptación: El diseño de la prótesis debe tener en cuenta factores ergonómicos para facilitar el uso prolongado sin molestias y que tenga la forma natural de las extremidades faltantes.
- Circuito EMG: Realizar un circuito EMG por cuenta propia podría ser factible en tema de precio, pero las desventajas eran la poca fidelidad de la señal, múltiples fallas del circuito, robustez del circuito, entre otros.

### 6.4 Innovaciones y Futuro de las Prótesis Biónicas

La investigación actual en prótesis biónicas se enfoca en mejorar la precisión y la naturalidad del control mediante inteligencia artificial y algoritmos de aprendizaje automático que permitan adaptar la respuesta del servomotor a patrones complejos de la señal EMG. También se está investigando en materiales más ligeros y resistentes, así como mejorar los

grados de libertad de la prótesis, para simular la rotación de la muñeca y control independiente de cada dedo.

## **7 Metodología**

### **7.1 Diseño CAD e impresión 3D**

Una de las funciones de una prótesis, es la de brindar la sensación al paciente de estar completo, por lo que es importante que la misma sea trabajada con un diseño ergonómico, específico y adaptado a las condiciones de cada paciente. En el caso de las prótesis de extremidades ya sean miembros inferiores o superiores, se intenta imitar la estructura fisiológica de la extremidad sana. Para esto se tienen que tomar medidas a circunferencias del bicep, antebrazo, codo, longitud del muñón, y tomar en cuenta la biomecánica de la extremidad.

Existen distintos tipos de softwares que nos permiten lograr la estructura que deseemos, las prótesis no son la excepción, programas como SolidWorks, Autodesk Fusion y Blender nos ofrecen un área de trabajo intuitiva para poder diseñar nuestra prótesis, en este caso se usó SolidWorks como principal programa de diseño.

Al ser una pieza articulada, el diseño se debe dividir en segmentos, para este diseño se dividió en: brazo, antebrazo, palma y dedos. El brazo y el antebrazo fueron diseñados en SolidWorks mientras que la palma y los dedos son un diseño reutilizado de CREOTEC. Hacer una palma con texturizado real requeriría un escaneo de una mano física o diseñado desde cero en Blender, ya que este programa se especializa en figuras no simétricas.

El principio de funcionamiento de la prótesis biónica es gracias a un actuador que será manejado por un Arduino, el cual tirará de hilos tensores que están desplegados en el interior de los dedos, provocando la flexión de estos, y la mano podrá extenderse gracias a hilos elásticos en la parte posterior de los dedos, que imitarán la función de los flexores de los dedos.

Posterior al diseño CAD concluido, se utilizará el programa laminador UltimakerCura para comenzar la impresión de las piezas de la estructura.



## 7.2 Electromiografía (EMG)

La utilización de sensores electromiográficos (EMG) en prótesis de extremidades permite una interacción más intuitiva y controlada entre el usuario y el dispositivo, ya que estos sensores pueden detectar la actividad eléctrica generada por los músculos al momento de contraerse. Esta señal bioeléctrica refleja la intención del usuario de mover su prótesis, permitiendo que la prótesis responda de manera acorde.

El módulo EMG implementado en este sistema tiene como función principal leer los biopotenciales generados por los músculos durante la fase de contracción. Estos biopotenciales son señales eléctricas que surgen como resultado de la actividad muscular. Un aspecto relevante es que, incluso en casos de amputaciones o daños musculares, los músculos remanentes pueden seguir generando actividad mioeléctrica, la cual puede ser capturada y registrada por el módulo. De esta manera, las señales aún presentes en los músculos no funcionales se aprovechan para generar movimientos en la prótesis.

Este módulo EMG está diseñado con una ganancia modificable, lo que permite ajustar la amplificación de la señal a las necesidades del diseño de la prótesis. Es fundamental que la señal resultante se mantenga dentro de los niveles adecuados para la entrada del microcontrolador, en este caso un **Arduino Nano**, que tiene un límite de entrada de 5V. Para asegurar la compatibilidad con el sistema y evitar sobrepasar este umbral, se configuran los picos mínimos y máximos de la señal de manera que el pico mínimo de la señal se establezca en 2.3V y el pico máximo en 4.7V. Este rango de amplitud asegura que la señal no exceda el límite de 5V, lo que podría dañar el sistema o generar errores en la lectura.

## 7.3 Control por MCU

El sistema de acción automática en prótesis biónicas se refiere a la capacidad de la prótesis para ejecutar movimientos sin la intervención constante del usuario, utilizando señales musculares para determinar las acciones apropiadas. Este control se logra mediante la programación de algoritmos que analizan las señales EMG (electromiografía) captadas durante la actividad muscular. Las señales EMG son generadas por las contracciones de los músculos y son

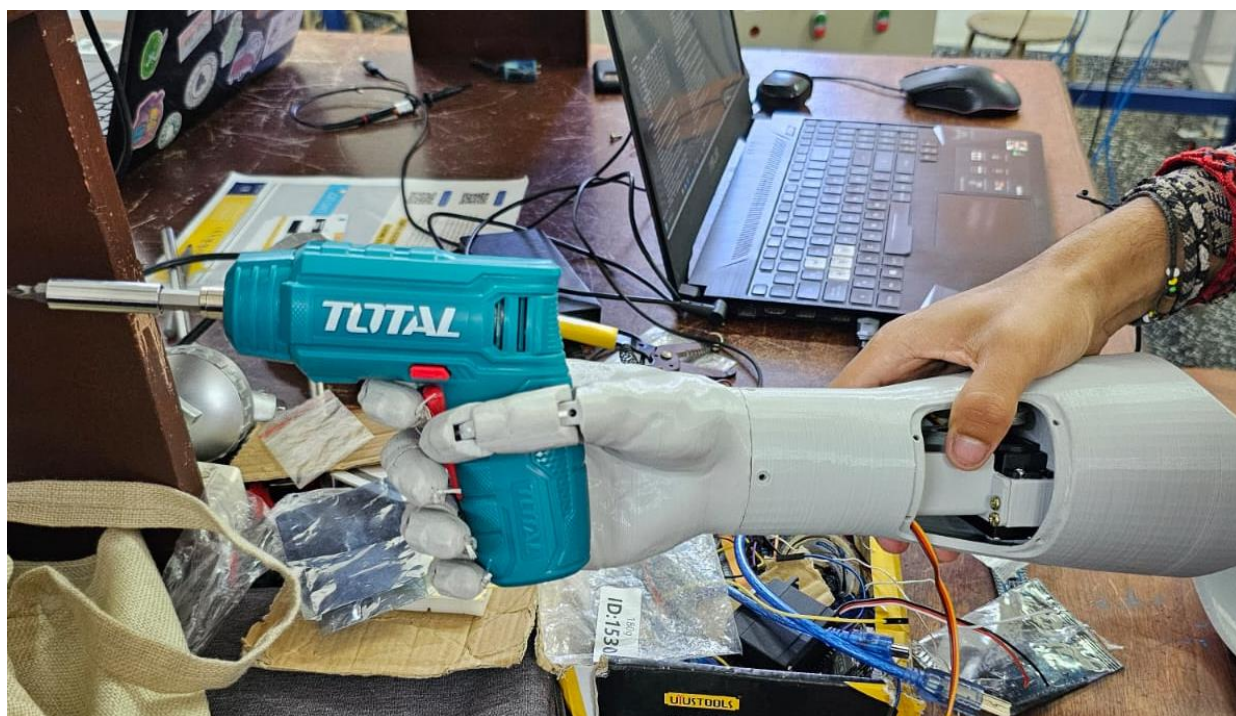
esenciales para detectar las intenciones del usuario. El proceso de interpretación de estas señales implica un mapeado donde las señales eléctricas captadas por los sensores EMG se traducen en movimientos específicos de la prótesis, como la flexión o extensión de un brazo. Este mapeado es realizado por un algoritmo implementado en el microcontrolador de la prótesis, que debe procesar las señales EMG en tiempo real para garantizar una respuesta rápida y precisa.

Un aspecto clave en el procesamiento de las señales EMG es la configuración de la ganancia del módulo EMG, ya que las señales generadas por los músculos pueden variar en amplitud. Dado que la entrada máxima de voltaje de un microcontrolador como Arduino es de 5V, es necesario ajustar la ganancia para que, incluso cuando se realice una contracción muscular máxima, la señal no sobrepase este límite. Esto no solo protege el microcontrolador, sino que también mejora la definición de la señal, permitiendo una interpretación más precisa de las contracciones musculares. Una vez procesada la señal, esta se convierte en una señal PWM (modulación por ancho de pulso), que es la forma digital que se utiliza para controlar el servomotor o el actuador de la prótesis, permitiendo que se realicen movimientos como abrir o cerrar la mano. En resumen, el sistema de acción automática de una prótesis biónica se basa en la lectura y el análisis de las señales EMG, la interpretación de estas mediante un algoritmo en tiempo real y la conversión de la señal analógica en un control PWM que maneja los movimientos del servomotor, logrando una respuesta rápida y precisa a las intenciones del usuario.

## Capitulo IV: Resultados y conclusiones

## 8 Resultados

La prótesis biónica que se desarrolló ha funcionado como se esperaba a pesar de los inconvenientes. Al integrar la tecnología EMG, los sensores han logrado captar las señales musculares de manera precisa, permitiendo que la prótesis responda de forma natural y fluida a los movimientos del usuario. Durante las pruebas, la prótesis ha demostrado un control eficiente, proporcionando una experiencia satisfactoria. Los resultados obtenidos han sido aprobados, ya que el dispositivo ha cumplido con los objetivos de funcionalidad, comodidad y control establecidos, se planea en otra versión, integrar completamente la placa dentro de la prótesis e independizarla de una conexión a un dispositivo externo.



*Prótesis finalizada y funcionando, sosteniendo una herramienta de trabajo.*

## 8.1 Costos

Ítem	Cantidad	Precio unitario (Bs)	Total
Arduino NANO	1	55	55
Sensor EMG	1	320	320
Servomotor	1	56	56
Baterías	2	7	14
Bobina Filamento PLA	1	110	110
Cables varios	1	16	16
Hilo tensor	1	15	15
<b>Total:</b>			<b>586</b>

## 9 Conclusiones

- La fabricación mediante impresión 3D con PLA permite una producción más accesible y económica, siendo viable el desarrollo de esta prótesis para pacientes con recursos limitados.
- La incorporación de un sensor EMG es efectivo para captar señales musculares del muñón o los músculos residuales, lo que permite un buen control de la apertura y cierre de la palma.
- El uso de un servomotor simplifica la mecánica y garantiza un funcionamiento confiable, aunque se podrían integrar motores más avanzados para mejorar la precisión y sobre todo la fuerza de agarre.
- La flexibilidad del diseño en impresión 3D facilita la personalización de la prótesis, adaptándose a las necesidades que tenga cada usuario en términos de tamaño, ajuste y funcionalidad.
- Aunque el PLA es adecuado por su bajo costo y facilidad de uso, podría evaluarse el uso de materiales más duraderos o resistentes para mayor vida útil, resistencia a impactos y resistencia ante cargas más fuertes.
- La fuerza del servomotor y los grados de libertad de la prótesis podrían ser más complejos y podrían mejorarse para aproximarse a funciones más naturales de un brazo humano

- Este proyecto representa un avance significativo en el desarrollo de prótesis accesibles y funcionales, mejorando la calidad de vida de los usuarios al permitirles recuperar ciertas capacidades motoras.
- Se podría integrar sensores hápticos o controladores más avanzados y precisos para ampliar las funciones y características de la prótesis.

## 10 Recomendaciones

Para evitar algunos errores que se presentaron durante el desarrollo, se dejan a continuación las siguientes recomendaciones:

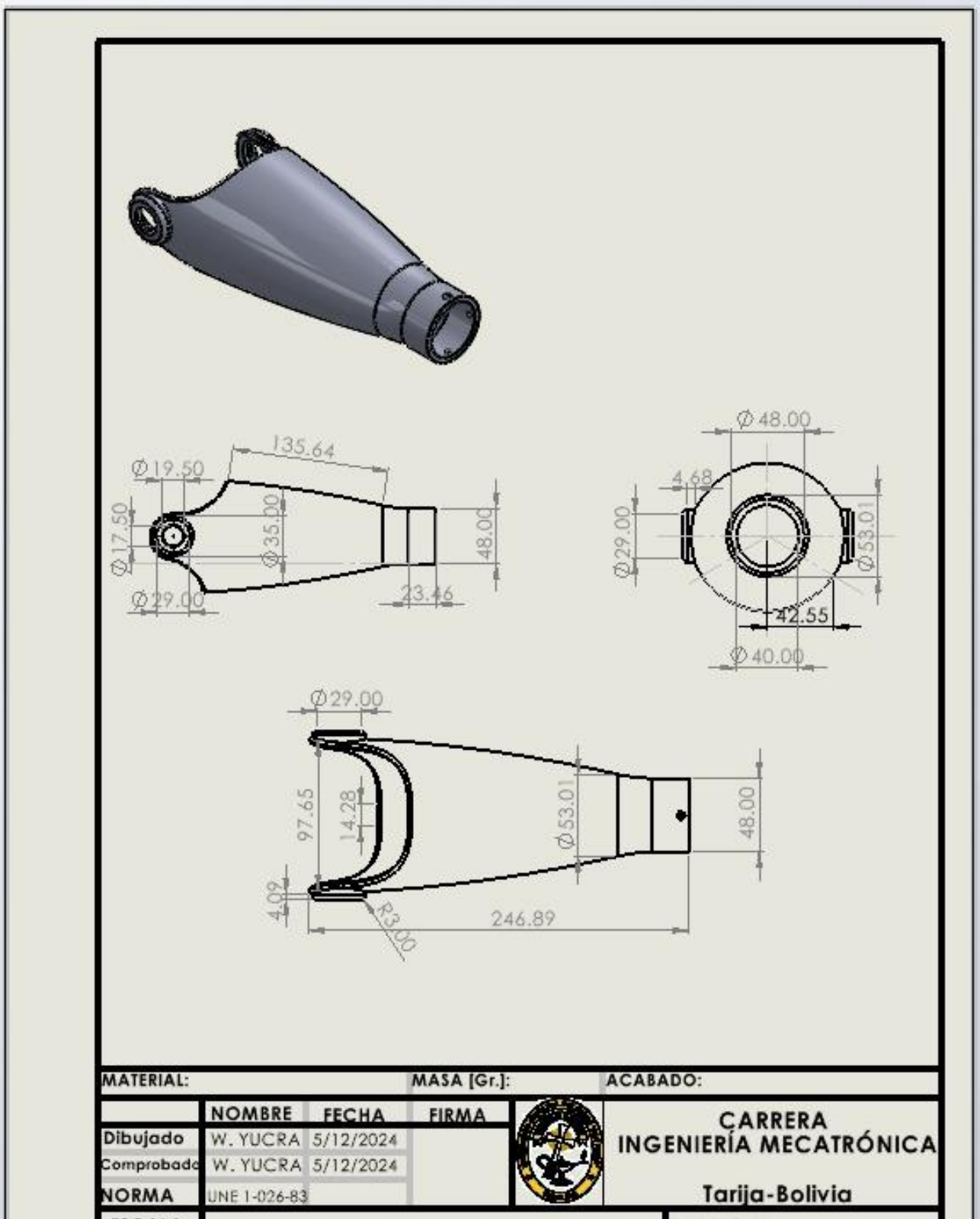
- Adaptar la salida máxima del módulo EMG al valor máximo de la entrada de la placa que se planifique usar.
- Tener en cuenta que el servomotor puede demandar corrientes altas que pueden sobre exigir al MCU.
- Tener en cuenta la “expansión horizontal” durante la impresión de piezas, ya que de esta depende de que encajen correctamente.
- Utilizar preferiblemente servomotores con engranajes metálicos, ya que los plásticos podrían desgastarse con la exigencia de agarre de la prótesis.
- Verificar que el puerto conectado al Arduino siempre sea el correcto en el programa Arduino IDE.
- Verificar de forma periódica la tensión de los hilos flexores.
- Administrar alimentación correcta a cada componente que lo requiera revisando sus especificaciones técnicas.

## 11 Bibliografía

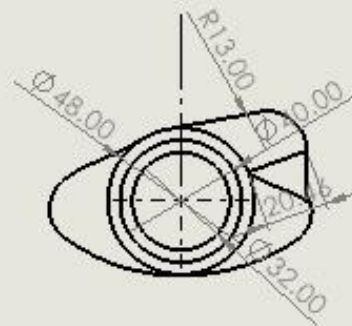
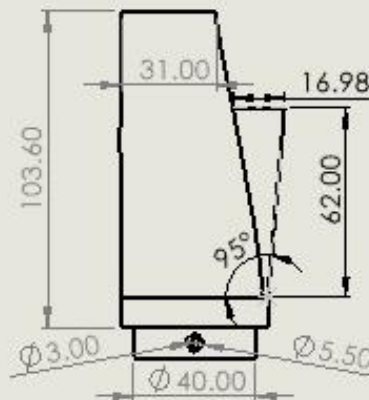
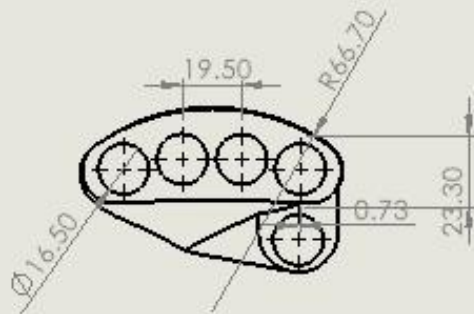
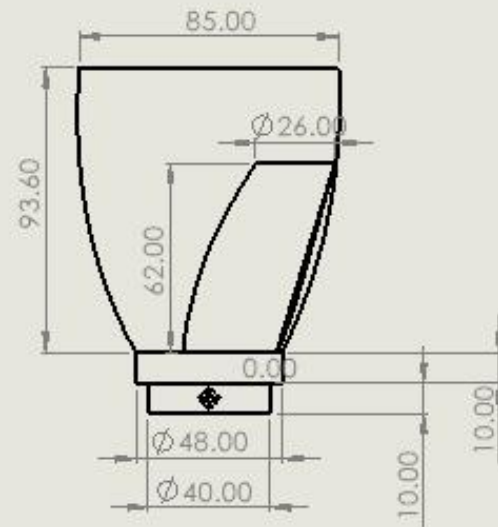
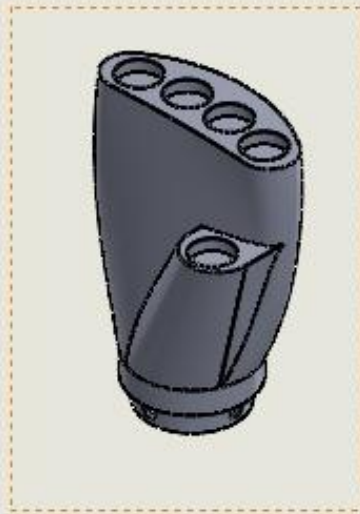
- *EMG básica: Guía para estudios de conducción nerviosa y electromiografía.* (Lyn D. Weiss MD Jay M. Weiss MD Julie K. Silver MD).
- Hurtado-Manzanera, P. A., Luviano-Cruz, D., Vidal-Portilla, L., & García-Villalba, L. A. (2018). *Diseño y construcción de un prototipo de prótesis mioeléctrica.* <https://portal.amelica.org/ameli/journal/170/1704654002/html/w>

- *Prótesis biónicas*. (2024b, marzo 18). Discapnet. <https://www.discapnet.es/innovacion/tecnologia-asistencial/protesis-bionicas>

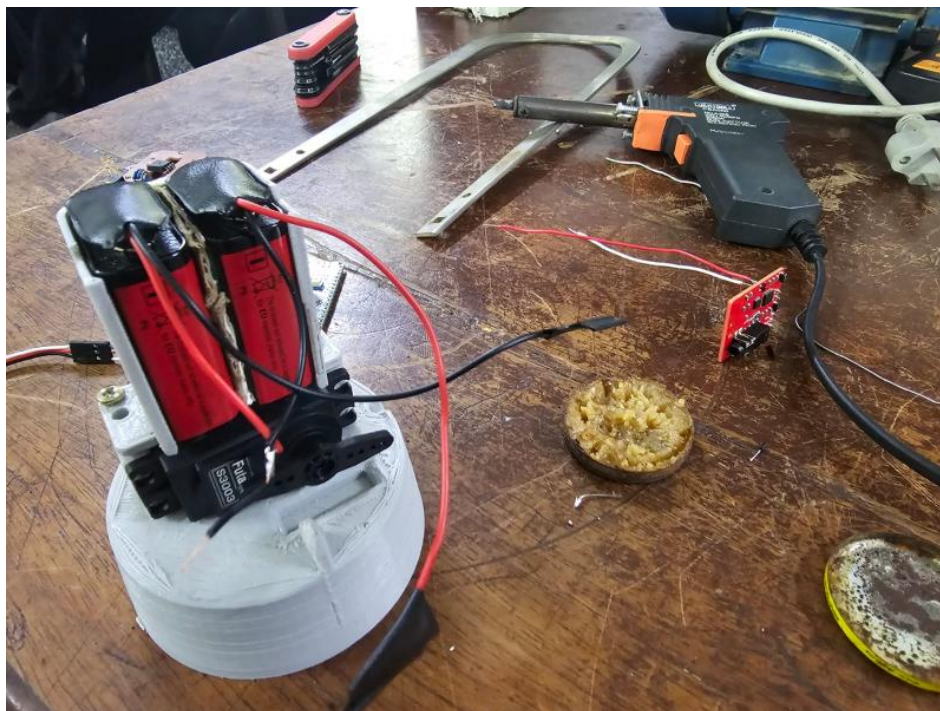
12 Anexos



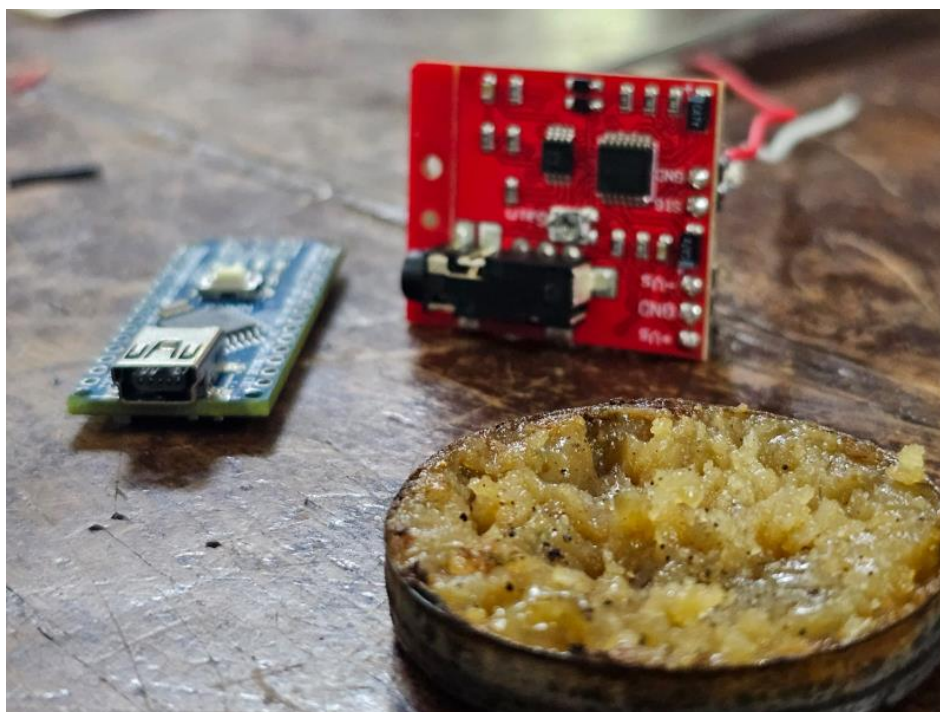




MATERIAL:		MASA [Gr.]:		ACABADO:	
	NOMBRE	FECHA	FIRMA	 <b>CARRERA INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>  Tarija-Bolivia	
Dibujado	W. YUCRA	5/12/2024			
Comprobado	W. YUCRA	5/12/2024			
NORMA	UNE 1-026-83				



*Pruebas de ensamblaje y funcionamiento.*



*Soldadura de componentes.*