



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM NEZAHUALCÓYOTL.

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS
INTELIGENTES

“DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE PRÓTESIS
ROBÓTICA PARA PERSONAS CON AMPUTACIÓN
TRANSRADIAL”

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA EN SISTEMAS INTELIGENTES

PRESENTA:

CRUZ CALDERÓN ADNY SAYTO

ASESOR:

M. EN C. EFRÉN GONZÁLEZ GÓMEZ



AGOSTO 2018

Dedicatoria.

A las personas más importantes, mis padres y mis hermanos, porque sé que siempre podré contar con ellos incondicionalmente.

A mi mejor amigo Eleazar, que siempre cree en mí, también por su gran nobleza y comprensión para conmigo.

Agradecimiento.

A mis padres por que sin ellos no hubiera llegado a este momento.

A mi familia y antepasados porque gracias a ellos soy como soy.

A mis amigos por su ayuda y hacerme el tiempo ameno.

Al Ingeniero Gilberto Mercado que sin su ayuda no hubiera redescubierto mi ingenio y por su apoyo en el proyecto.

Al maestro Efrén por todo su apoyo y paciencia en el transcurso de la universidad y en este proyecto.

A mi amigo Gabriel que siempre esta cuando lo necesito.

A todos los maestros que he tenido en el trascurso de mi vida, porque todos han dejado algo.

A todas las personas que me han ayudado directa o indirectamente.

A ese Eureka que siempre aparece oportunamente con la solución a cualquier problema o pregunta.

Contenido

Resumen.	8
Organización de la Tesis.	9
o Introducción.	10
□ Planteamiento del problema.	10
□ Objetivo general.	11
□ Objetivos específicos.	11
□ Justificación.	11
Metodología.	12
1. Estado del Arte.	14
1.1. Introducción.	14
1.2. Algunas prótesis comerciales.	14
1.3. Conclusiones.	16
2. Marco Teórico.	18
2.1. Niveles de amputación de extremidades superiores.	18
2.2. Tipos de prótesis de miembro superior.	18
2.3. Elementos Protésicos.	22
2.4. Músculos del antebrazo.	23
2.5. Movimientos de los dedos de las manos.	24
2.6. Sensores.	26
2.7. Placa Arduino Nano.	31
2.8. Formas de conectar a un pulsador.	32
2.9. Algoritmo de control para la mano, basado en la Distancia Euclidiana.	35
2.10. Diseños consultados de prótesis de mano en 3D.	36
2.11. Actuadores.	39
2.12. Mecanismos.	42
2.13. Encoders.	45
2.14. Circuitos.	47
2.15. Placa Arduino pro mini utilizada en el circuito de la mano.	48
2.16. Led RGB ánodo común.	49
2.17. Formas de Alimentar un circuito.	50
2.18. Impresión 3D.	52

3. Metodología Propuesta.	59
3.1. Recolección de Información.	59
3.2. Procesamiento de la Señal y Programa de Control.	61
3.3. Diseño de la Prótesis de Mano en 3d.	74
3.4. Actuadores, Mecanismos y Encoders.	79
3.5. Circuito de la Mano Robótica.	91
3.6. Últimas Modificaciones.	95
3.7. Impresión y Armado.	98
4. Resultados.	103
4.1. Introducción a la sección.	103
4.2. Pruebas de movimiento.	103
4.3. Conclusiones a la sección.	104
5. Conclusiones.	106
6. Trabajos Futuros.	108
7. Contribuciones.	110
8. Glosario.	118
9. Referencias	119
Apéndice 1.	124
Mecanismos por Engranajes.	124
Apéndice 2.	127
Costos del proyecto.	127

Resumen.

Desde tiempos ancestrales las prótesis, en sus formas básicas, han existido, porque el ser humano busca una solución, para cada necesidad.

En el presente trabajo se muestran la investigación para la construcción de un prototipo de prótesis robótica, para personas con amputación transradial.

Se escucharon las necesidades y expectativas que tiene una persona al adquirir una prótesis, con base en esto se desarrolló el prototipo, cuidando la estética por medio de la impresión 3D; El control, con el movimiento muscular del antebrazo basado en pulsos y procesado con un microcontrolador Arduino; Las pruebas para seleccionar un motor y un mecanismo que proporcione fuerza y control de cierre de los dedos, y uno de los puntos más importantes, que el prototipo final sea de bajo costo, para que cualquier persona con amputación transradial pueda tener una.

Abstract.

Prosthesis in simple way have existed since ancient time, because human being search a solution to every situation.

In the present work is shown the research to build a robotic prosthetic prototype, to persons with below elbow amputation.

The necessities and expectation that a person has at the time of purchase of a prosthetic, was heard, on the basis of this, a prototype was developed, taking care of esthetic using the 3D impression; The control with pulses of forearm's muscular movements and processed with an Arduino microcontroller; The trials performed to select a engine and a mechanism that provide strength and fingers's close control, and one of the most important points is that the final prototype accessible to persons with below elbow amputation.

Organización de la Tesis.

Esta tesis está conformada por los siguientes capítulos.

Introducción.

Contiene el planteamiento del problema, objetivo general, objetivo específico, justificación y metodologías aplicada en la tesis.

Capítulo 1. Estado del Arte.

En este capítulo se analizan y se comparan diferentes prótesis comerciales.

Capítulo 2. Marco Teórico.

Se muestra toda la investigación realizada sobre sensores, actuadores, mecanismos, etc. Para desarrollar un prototipo de prótesis.

Capítulo 3. Metodología Propuesta.

Se muestran los resultados de las pruebas, las selecciones que se hicieron en motores, mecanismos, sensores, modificaciones del diseño seleccionado de mano, diseño del circuito y control de mano.

Capítulo 4 Resultados.

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas con el prototipo al abrir y cerrar, el poder tomar objetos grandes y pequeños que no pesen más de 7Kg y hacer uso de ellos.

Conclusiones.

Se realiza una valoración de la mano, si es que se cumplieron los objetivos inicialmente propuestos, checando los pros y los contras generales del prototipo, sugiriendo mejoras o cambios de materiales, actuadores o mecanismos que se implementaron.

○ **Introducción.**

● **Planteamiento del problema.**

Las extremidades que tiene el cuerpo humano son de suma importancia para desarrollar las actividades que se presentan en el día a día, la falta de alguna de ellas puede afectar en cómo nos desenvolvemos en las diferentes áreas de la vida.

En México no poder caminar o moverse de forma independiente es el primer tipo de discapacidad, hay 7.1 millones de habitantes que tienen algún tipo de discapacidad, de los cuales 33.0 por ciento es no mover o usar sus brazos o manos, según la base de datos del INEGI en la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica 2014. [1] El IMSS en sus estadísticas de Salud en el Trabajo, registró en 2016 más de 394 mil accidentes de trabajo, donde las lesiones de mano ocupan el primer lugar con el 27.9%, que es un total de 110 mil 127 trabajadores, de estos 3 mil 306 trabajadores perdieron total o parcialmente el miembro superior. [2]

En el presente trabajo se busca hacer una prótesis accesible para todo el que lo necesite, ya que hay personas que al no poder adquirir una de ellas dejan su brazo solo con el muñón o utilizan prótesis que tiene ganchos en los extremos, lo que no ayuda a integrarse en una vida laboral normal.

Que una prótesis sea discreta es importante porque las personas quieren pasar desapercibidas y no andar con un montón de cables por todas partes, por lo que utilizar un sensor discreto y un diseño estético es fundamental.

También hay que tomar en cuenta el peso que tiene una prótesis para no afectar con el uso y el paso del tiempo el sistema óseo de las personas.

El sensor que se piensa implementar será diseñado para ser adaptado en alguna parte del brazo para que este envíe las lecturas a un microcontrolador Arduino.

Para que la mano permita al usuario ser más independiente, se busca que tenga varios grados de libertad, identificando las señales que mande el sensor que se seleccione y aplicando un control por medio de casos.

En pocas palabras con el prototipo de prótesis robótica para personas con amputación transradial se cubrirán las áreas de mecánica, electrónica, programación y se desarrollarán

nuevas habilidades como el diseño y modelado asistido por computadora y la creación del sensor a utilizar.

- **Objetivo general.**

Desarrollar un prototipo de prótesis robótica que sirva a personas que han perdido la mano por amputación transradial y esta sea controlada por el movimiento del antebrazo para poder articular los dedos, tomar objetos y si es necesario hacer uso de ellos.

- **Objetivos específicos.**

- Crear un sensor para que este pueda mandar señales a un microcontrolador.
- Realizar pruebas con diferentes sensores, para elegir al que mejor se adapte y posteriormente pueda ser implementado en el prototipo.
- Buscar un diseño libre de mano y modificarlo en un entorno 3D para adaptarla a las particularidades del proyecto.
- Diseñar la mecánica para que la prótesis tenga diferentes grados de libertad.
- Generar un código en Arduino que identifique las señales que manda el sensor y el movimiento del antebrazo, éste será el que controle los movimientos de la prótesis.

- **Justificación.**

Muchas personas no tienen la capacidad económica de afrontar el costo de una prótesis, por lo que se realizara un prototipo que resulte accesible para todos.

Con el desarrollo de este prototipo de prótesis de mano, se busca, primero que nada, crear un sensor que sea eficiente y económico, así se podría reducir considerablemente el costo de esta.

Algunas prótesis de mano solo tienen la función de abrir y cerrar, solo sirve para tomar objetos grandes, lo que las hace no ser tan funcionales como lo requiere las actividades de la vida diaria. La eficiencia y la reducción de costos de este proyecto se logrará incorporando ingenio y el uso de tecnologías como el uso de una impresora en 3D para la impresión de todas las partes de la mano.

Metodología.

El método a seguir en esta tesis para el desarrollo del prototipo consistirá de las siguientes etapas:

- 1) Se investigarán los diferentes sensores utilizados en prótesis de miembro superior como son el sensor mioeléctrico, de presión, por mencionar algunos.
- 2) Realizar una entrevista a una persona que necesite una prótesis de mano transradial, para conocer las expectativas del usuario al adquirir una.
- 3) Con base en el conocimiento adquirido, se probarán diferentes sensores y el que arroje mejores resultados para cada movimiento del brazo será el seleccionado o en caso de ser necesario se creará un sensor que sea económico y funcional para el proyecto.
- 4) Analizar las lecturas que manda el sensor y con base en lo anterior se desarrollará un programa que controlará los movimientos de la mano.
- 5) Seleccionar un diseño libre de prótesis de mano en 3D de un banco de imágenes y modificarlo en un entorno tridimensional.
- 6) Se seleccionará basándose en pruebas los motores y el mecanismo que mejor funcionen, para que la mano tenga diferentes grados de libertad.
- 7) Finalmente se conjuntará todo el proyecto y se realizarán las pruebas para ver si la prótesis puede tomar objetos con facilidad, no importando la forma que estos tengan.
- 8) Los tipos de investigación que se piensan utilizar para esta tesis son hipotético, deductivo, analítico y las técnicas de recolección de datos son la experimentación, la entrevista, la observación y la medición, justificados en las etapas anteriormente mencionadas.

1. Estado del Arte.

1.1. Introducción.

En este capítulo se analizarán algunas prótesis comerciales para saber qué es lo que ofrecen, conocer sus ventajas y desventajas de cada una, también para ver cómo funcionan, qué mecanismos, motores y control de movimiento utilizan. Al final de este capítulo se describirán ventajas y desventajas que presentan las prótesis reseñadas.

1.2. Algunas prótesis comerciales.

- **Prótesis robótica a 3D.** Es de la empresa Prótesis Avanzada, tiene movimiento independiente en cada dedo, tiene funciones programables para diferentes tipos de agarres, prótesis con gran precisión, usa batería de litio y un control mioeléctrico y la mano es impresa en 3D.



Imagen 1. Prótesis robótica a 3D. Tomada de [3]

- **Prótesis impresa en 3D.** Es de la empresa OpenBionics. Tiene movimiento independiente en cada dedo. El dedo pulgar gira 90 grados, funciona con un sensor mioeléctrico. Agarraderas de micro gel en cada punto del dedo para un mejor agarre de los objetos, cordón de acero que se usa como tendón en cada dedo, un motor actuador lineal, y la mano es impresa en 3D en PLA.

Su costo es de 1499 libras unos 38750 pesos mexicanos. [4]



Imagen 2. Prótesis impresa en 3D OpenBionics. Tomada de [4]

- **BeBionic 3**, de la empresa bebionic, tiene motores individuales en cada dedo, 14 formas de sujeción seleccionables, control proporcional de la velocidad que da la presión necesaria al sostener objetos, la posición del dedo pulgar es seleccionable, su control es por medio de un sensor mioeléctrico, los motores que utiliza son actuadores lineales.



Imagen 3. BeBionic 3. Tomada de [5]

- **Artificial Hands**, del instituto BioRobotics de la escuela de estudios avanzados de Sant'Ann, utiliza una interfaz hombre-máquina, es controlada por el pensamiento (no es invasivo), para el control fisiológico de la presión y contiene sensores táctiles artificiales robustos, por el tipo de control se sabe que cada dedo es independiente, no especifica el tipo de motores que utiliza, pero al parecer son lineales.



Imagen 4. Artificial Hands. Tomada de [6]

- **Prótesis biónica**, de la empresa mexicana Probionics, la prótesis se controla de forma natural y son totalmente movibles de forma biológica, además cuentan con la función de la apertura y cierre de la mano a modo de pinza, el movimiento de la muñeca y el antebrazo en 360 grados, la flexión del codo y la elevación del hombro. [7]

Una de sus prótesis de brazo completo que ofrece Probionics cuesta 180 mil pesos mexicanos



Imagen 5. Prótesis biónica. Tomada de [8]

- **Prótesis de manos y dedos**, del Instituto Mexicano de Rehabilitación Protésica (IMERP), se concentran en adaptar prótesis que ayuden a mejorar la apariencia, la imagen corporal, para una mejor integración social, en pocas palabras desarrollan prótesis pasivas, estéticas y cosméticas.



Imagen 6. Prótesis cosmética de mano. Tomada de [9]

1.3. Conclusiones.

Todas las prótesis comerciales citadas en este capítulo son estéticas sobre todo las del IMERP, la única desventaja de está, es que solo es cosmética.

Todas son biónicas, descartando las prótesis IMERP, por lo que utilizan sensores mioelectricos, la mayoría utiliza motores lineales y bebionic es la única que tiene giro de muñeca.

La única desventaja de esta prótesis es que son bastante costosas por ejemplo la Prótesis impresa en 3D, la más económica es la ‘prótesis biónica’ de Probionics que cuesta 180 mil pesos mexicano, pero aun así sigue siendo inaccesible para muchas personas.

2. Marco Teórico.

Introducción.

En este capítulo se desarrolla toda la investigación de movimiento de musculo, dedos, hasta sensores, mecánica, mecanismos y electrónica para poder desarrollar un prototipo de prótesis robótica para personas con amputación transradial.

2.1. Niveles de amputación de extremidades superiores.

Las amputaciones de miembro superior son clasificadas dependiendo la altura en donde se realizó el corte.



Imagen 7. Niveles de amputación de extremidades superiores. Tomada de [10]

2.2. Tipos de prótesis de miembro superior.

Existen dos tipos de prótesis las pasivas y las activas. Éstas últimas se dividen en más tipos.

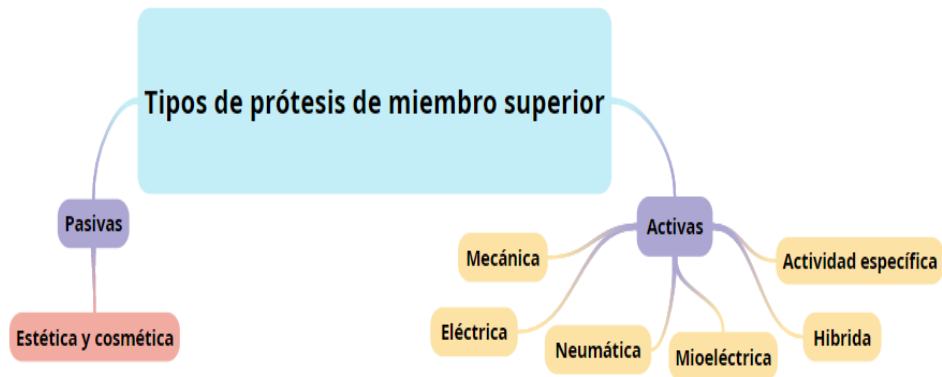


Figura 1. Clasificación de prótesis.

A continuación, se describirán las prótesis activas que aparecen en la figura 1

2.2.1. Prótesis pasivas.

Son las prótesis que su única función es la estética y la cosmética, se puede usar para todos los niveles de amputación, deben satisfacer las exigencias del paciente con respecto al aspecto, confort y peso de la prótesis. [11]



Imagen 8. Prótesis estéticas o cosméticas. Tomada de [12]

2.2.2. Prótesis activas.

Son prótesis accionadas y controladas por movimientos generales del cuerpo y se clasifican en:

➤ **Mecánica (accionado por el cuerpo).**

Se conecta al cuerpo a través del uso de cables o arneses. Utiliza los movimientos de alguna parte del cuerpo (generalmente hombros y brazos) para abrir y cerrar a voluntad un dispositivo. La terminal de la prótesis es una mano o pinza. [13]

Se cubre con un guante y se limita a agarrar objetos grandes.

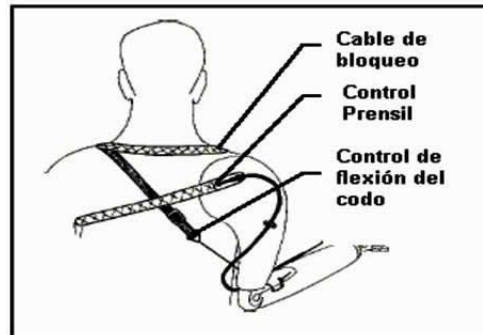


Imagen 9. Elementos constitutivos de una prótesis mecánica. Tomada de [13]

➤ **Prótesis Eléctricas.**

Son controladas de diferentes formas, con servo motores como dispositivos terminales, botón o botones pulsadores o con un arnés. [13]

Utilizan un socket el cual es un dispositivo intermedio entre la prótesis y el muñón.

Son costosas, pesadas y como están ensambladas con componentes electrónicos se debe de tener cuidado a exponerlas al agua.



Imagen 10. Prótesis de mano activa eléctrica de pinza. Tomada de [14]

➤ **Prótesis neumáticas.**

Se accionaban con ácido carbónico comprimido, este proporcionaba una gran energía, pero también se corría un riesgo al utilizar este tipo de prótesis, lo que era un gran inconveniente debido a sus accesorios y al mismo ácido, [13] el movimiento es transmitido por un sistema de tubos lo que permite una precisión y control de fuerza al tomar objetos grandes o pequeños.



Imagen 11. Prótesis neumática. Tomada de [15]

➤ **Prótesis mioeléctricas.**

Como su nombre lo indica son prótesis eléctricas; su control es por medio de un sensor mioeléctrico. Son de un alto grado de rehabilitación y permiten que el movimiento de cada dedo sea independiente, sintetiza un aspecto estético, tiene fuerza, velocidad y precisión. El sensor mioeléctrico utiliza unos electrodos que entran en contacto con la piel y permiten registrar la señal electromiograma (EMG), [13] esta registra la actividad eléctrica producida por los músculos esqueléticos, después la señal se procesa por un microcontrolador para producir un movimiento.

Estas prótesis junto con las neumáticas, son las más costosas del mercado.

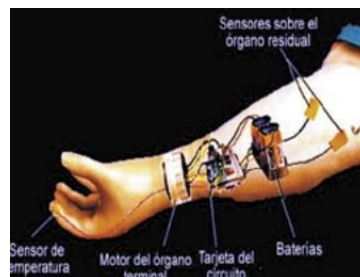


Imagen 12. Configuración básica de una prótesis mioeléctrica. Tomada de [13]

➤ **Prótesis Híbridas.**

Una prótesis híbrida combina los movimientos de alguna parte del cuerpo con el accionamiento por electricidad en una sola prótesis. Las prótesis híbridas sirven para individuos que tienen amputaciones o deficiencias transhumerales (arriba del codo). Las prótesis híbridas utilizan con frecuencia un codo accionado por el cuerpo y un dispositivo terminal controlado en forma mioeléctrica (gancho o mano).



Imagen 13. Prótesis Híbrida. Tomada de [11]

➤ **Prótesis de actividad específica.**

Este tipo de prótesis son diseñadas para personas que realicen algún tipo de deporte, pasatiempo, recreación o actividad que no le sea posible realizar con las prótesis comunes. [16]

Su diseño es personalizado y puede utilizar materiales más resistentes que el de otras prótesis.



Imagen 14. Prótesis para jugar golf. Tomada de [10]

2.3. Elementos Protésicos.

En la figura siguiente se muestran los elementos básicos que debe contener una prótesis

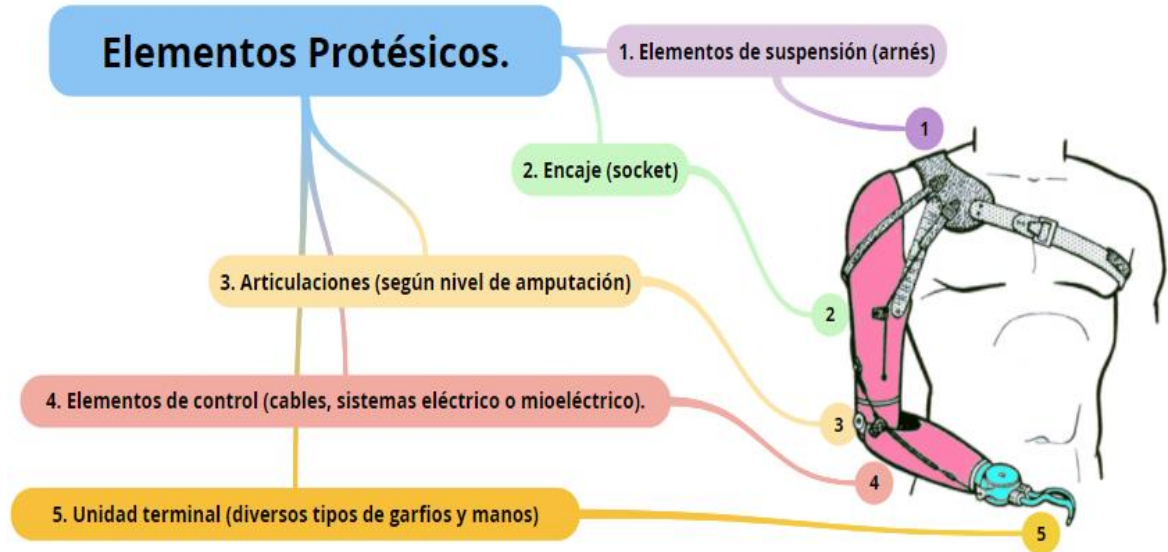


Figura 2. Elementos protésicos básicos.

2.4. Músculos del antebrazo.

2.4.1. Miembro Superior.

Los miembros superiores en el cuerpo humano se conforman de cada una de las extremidades que se fijan a la parte superior del tronco. Se compone de cuatro segmentos: cintura escapular, brazo, antebrazo y mano y se caracteriza por su movilidad y capacidad para manipular y sujetar. Tiene en total 33 huesos y 42 músculos. [17]

La región muscular del antebrazo está compuesta por veinte músculos, y se dividen en tres regiones musculares:

Región ventral (8 músculos).

Región externa (4 músculos).

Región dorsal (8 músculos). [18]

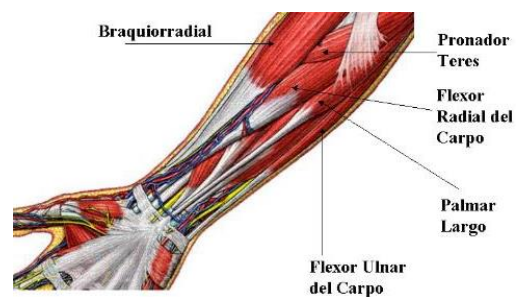


Imagen 15. Músculos del antebrazo. Tomada de [18]

En la siguiente tabla se describe la acción que realiza cada músculo del antebrazo

Músculos

Flexor Radial del Carpo.

Descripción.	Acción.
Es el mayor músculo del antebrazo, forma el primer plano del grupo de músculos anteriores del brazo.	Flexiona principalmente la muñeca, también flexiona el codo.

Pronador Teres.

Descripción.	Acción.
Músculo superficial del antebrazo, localizado en la parte externa y anterior del antebrazo.	Rota y flexiona el antebrazo.

Braquiorradial.

Descripción.	Acción.
Es el músculo largo del brazo en la región externa y superficial del antebrazo.	Flexiona el antebrazo a nivel de codo.

Palmar Largo.

Descripción.	Acción.
Músculo visible como un tendón pequeño entre el flexor radial del Carpo y flexor ulnar del carpo.	Flexiona la muñeca.

Flexor Ulnar del Carpo.

Descripción.	Acción.
Músculo largo y cilíndrico del antebrazo humano, se encuentra en la parte interna y anterior del antebrazo.	Flexiona y realiza un giro medio de la mano.

Tabla 1. Músculos del antebrazo [14].

2.5. Movimientos de los dedos de las manos.

Los movimientos de los dedos de las manos se realizan por las articulaciones metacarpo falángicas e inter falángicas que permiten una extensión y una flexión y la abducción y aducción, que es cuando los dedos se separan.

Las articulaciones metacarpo falángicas se encuentran entre las cabezas distales de los metacarpianos y las falanges proximales de los dedos, estas articulaciones permiten flexión, extensión, abducción, aducción y rotación limitada.



Imagen 16. Articulaciones metacarpo falángicas. Tomada de [19]

La amplitud de las articulaciones metacarpo falángicas son de 30 a 45 grados para la extensión y 90 grados para la flexión.

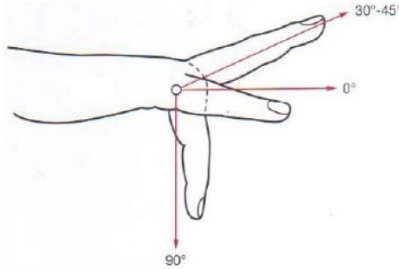


Imagen 17. Amplitud del movimiento de la articulación metacarpo falángica. Tomada de [19]

Las articulaciones inter falángicas existen de dos tipos por cada dedo excepto el del dedo pulgar ya que carece de falange media.



Imagen 18. Articulación inter falángicas. Tomada de [19]

La amplitud de las articulaciones inter falángicas son para la media de 0 grados para la extensión y 100 grados para la flexión, para la distal de 10 grados para la extensión y 90 grados para la flexión.

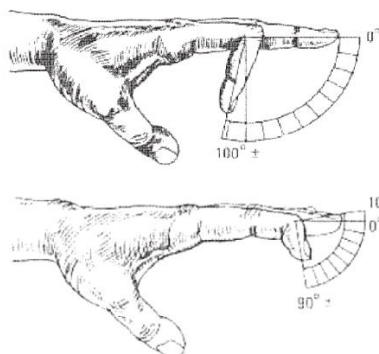


Imagen 19. Flexión y extensión de las falanges distal y media. Tomada de [19]

2.5.1. Dedo pulgar.

La amplitud de las articulaciones metacarpo falángicas son de 0 grados para la extensión y de 75 a 80 grados para la flexión, pequeños movimientos de lateralidad.

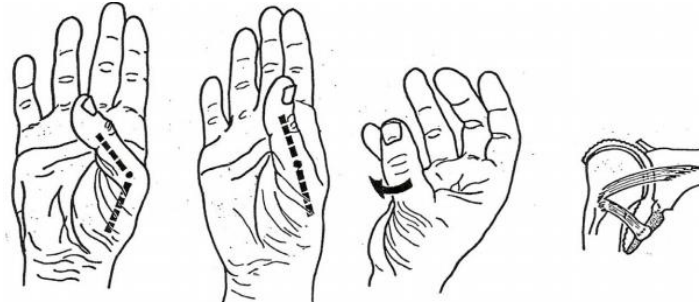


Imagen 20. Articulación metacarpo falángicas del dedo pulgar. Tomada de [20]

La amplitud de las articulaciones inter falángicas para la distal es de 5 a 10 grados, pero puede llegar a 30 grados de forma pasiva, para la extensión y 75 a 80 grados para la flexión.

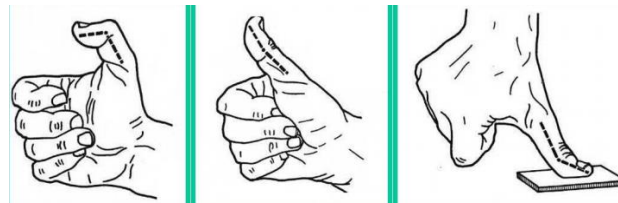


Imagen 21. Articulación interfalángica del dedo pulgar. Tomada de [20]

Como se puede observar los movimientos que tiene un miembro superior son complejos y complicados. En la siguiente sección se investigarán sensores que ayudarán a procesar el movimiento de un músculo braquiorradial.

2.6. Sensores.

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser, por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, movimiento, pH, etc. [21] Las lecturas que mandan son análogas o digitales según sea necesario y estas pueden ser representadas de diferentes maneras, por ejemplo, graficas de barras, simplemente un número, etc.

2.6.1. Propuesta de Sensores.

Con el movimiento observado del músculo braquiorradial, se analizaron varias opciones de sensores que se podrían utilizar para implementarse en el proyecto.

En la siguiente sección se muestran los diferentes tipos de sensores.

2.6.2. Tipo de sensores.

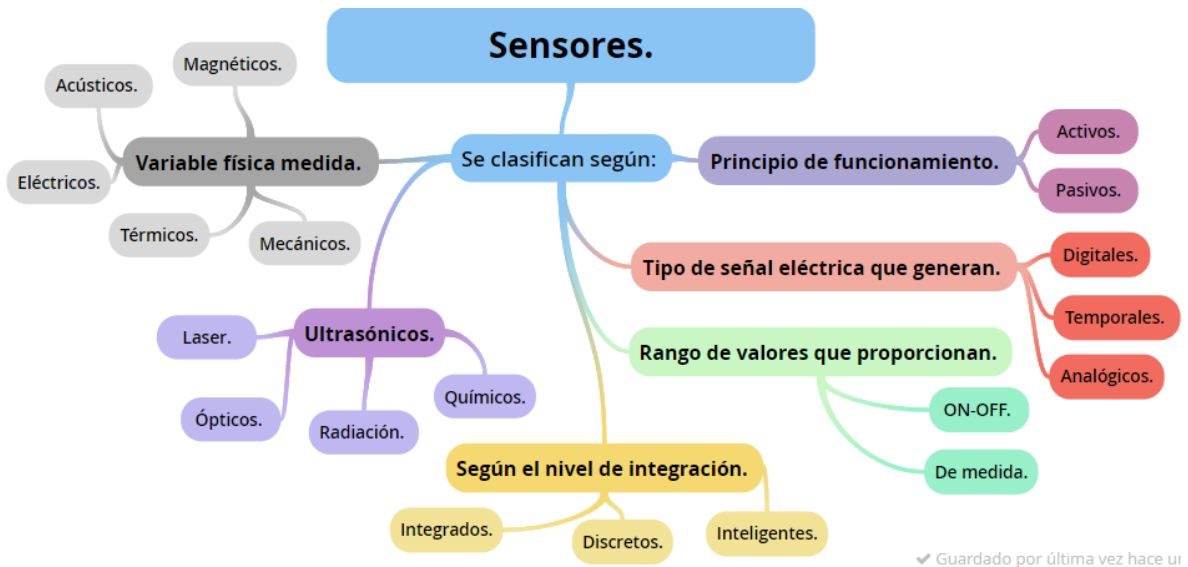


Figura 3. Clasificación de los sensores.

Los sensores seleccionados fueron:

2.6.2.1. Sensores resistivos.

Los sensores moduladores del tipo resistivo son aquellos que varían una resistencia en función de la variable a medir. [22]. A continuación, se describen algunos:

- **Fotorresistencia.**

Es una resistencia que varía en función de la luz, cuanto mayor sea la intensidad de la luz menor será su resistencia y cuando menos luz perciba

mayor será su resistencia, puede mandar una lectura análoga o digital, según se programe.



Imagen 22. Fotorresistencia.

- **Sensor de presión.**

Detecta la fuerza o flexión que se le aplica en la membrana, al detectar una flexión más puntos tocan el semiconductor y cambia su resistencia interna, lo que hace que su resistencia aumente. Puede mandar lecturas análogas o digitales, según se requiera, su resistencia varía de 100Kohms a 200ohms.



Imagen 23. Sensor de presión.

- **Sensor flexible.**

Produce una resistencia variable en función del grado al que este se doblada, convierte la curvatura en distintos valores de resistencia eléctrica, varía su resistencia de 10 a 50K, manda lecturas análogas.

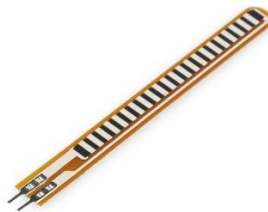


Imagen 24. Sensor flexible.

2.6.2.2. Sensor mecánico.

Son dispositivos que cambian su comportamiento bajo la acción de una magnitud física que pueden directa o indirectamente transmitir una señal que indica cambio.

[23]

- **Pulsador.**

Tiene una lectura digital y los rangos o valores que proporciona son ON-OFF, solo cierra un circuito de dos hilos, funcionaría como los sensores limitswitch o final de carrera.



Imagen 25. Botón pulsador.

2.6.3. Formas de estabilizar sensores.

El acondicionamiento sirve para estabilizar las lecturas de los sensores evitando el ruido electrónico. Existen dos formas de realizar el acondicionamiento, a saber: por medio de la electrónica y por medio de la programación. Se describirán las dos formas de acondicionamiento de sensores resistivos a continuación.

2.6.3.1. Acondicionamiento de sensor resistivo.

El acondicionamiento de una señal consiste en la manipulación electrónica de dicha señal, con los dispositivos adecuados, para obtener rangos de voltajes o corrientes adecuados a las características del diseño. [25]

Existen diferentes métodos de acondicionamiento por medio de electrónica, se clasifican en tres grupos:

- **Amplificador operacional.**

Circuito electrónico con dos entradas y una salida. La salida es la diferencia de las dos entradas multiplicada por un factor G (ganancia).

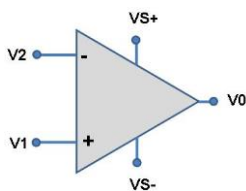


Imagen 26. Amplificador Operacional. Tomada de [24]

➤ **Puente de Wheatstone.**

Instrumento de gran precisión, se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente, son cuatro resistencias que forman un circuito cerrado.

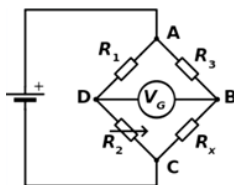


Imagen 27. Puente de Wheatstone. Tomada de [24]

➤ **Amplificador de instrumentación.**

Es un dispositivo creado a partir de amplificaciones operacionales. Está diseñado para tener una alta impedancia de entrada y un alto rechazo al modo común. [24]

Se utiliza común mente en aparatos que trabajan con señales débiles, por ejemplo, equipos médicos.

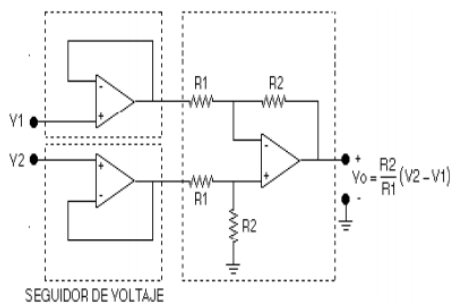


Imagen 28. Amplificador de instrumentación. Tomada de [24]

➤ **Por medio de programación.**

Simplemente se obtiene el promedio de cierto número de lecturas que mande el sensor.

Una vez que elegido el sensor, se tiene que considerar el microcontrolador para realizar las pruebas para lo cual se describirán algunas placas de desarrollo como el Arduino nano y mini los cuales se utilizarán en este proyecto y que serán descrito a continuación.

2.7. Placa Arduino Nano.

Este microcontrolador fue el que se utilizó para realizar las pruebas.

➤ **Descripción.**

La placa Arduino Nano se basa en el microcontrolador ATmega328. Funciona con un cable Mini-B USB para la alimentación. Operan a 5 voltios. Cada pin provee o recibe un máximo de 40mA, tiene pines 0 (RX) y 1 (TX) que son utilizados para recibir y mandar datos TTL vía serie, 14 pines digitales que pueden ser utilizados como entrada y salida., 8 entradas analógicas cada una de 10 bits de resolución (1024 valores diferentes). [25]

➤ **Características.**

Tensión de entrada (recomendada): +7 a + 12 V.

Tensión de entrada (límites): +6 a + 20 V.

14 pines GPIO (de los que 6 ofrecen salida PWM).

6 pines de entrada analógica.

Corriente DC por pin de E/S: 40 mA.

Memoria Flash de 32 KB (2 KB para cargador de inicio).

SRAM de 2 KB.

EEPROM de 1 KB.

Admite comunicación serie IC.

Frecuencia de reloj: 16 MHZ.

Dimensiones: 0,73" x 1,7".



Imagen 29. Arduino Nano.

2.8. Formas de conectar a un pulsador.

Existen dos formas de conectar un pulsador en Arduino para evitar un corto circuito, y eso depende de donde se coloquen las resistencias es el Pull-Down y el Pull-Up.

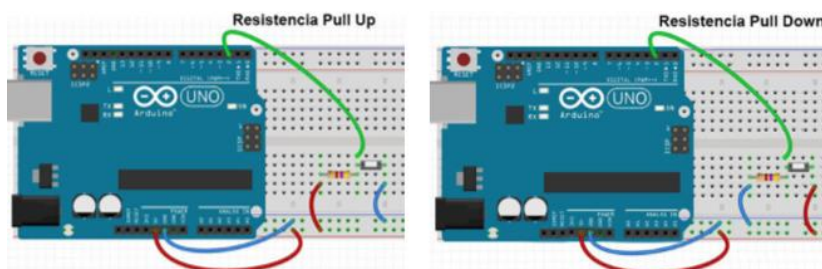


Imagen 30. Esquema de conexión de la resistencia Pull Up y Pull Down. Tomada de [26]

Cada esquema garantiza un valor determinado al pin digital al que esté conectado, cuando el pulsador se presiona, la corriente viajara por el camino donde no hay resistencia.

La resistencia Pull Up marca un estado HIGH, aunque el pulsador no este presionado, cuando este se presiona el estado cambia a LOW.

La resistencia Pull Down marca estado HIGH si el pulsador fue presionado, si este no se presiona marca un valor LOW.

2.8.1. Formas de quitar rebotes o ruido electrónico en los pulsadores.

Los rebotes son fluctuaciones(ruido) electrónicas en los pulsadores, son detectados por la rapidez con la que trabaja un microcontrolador, por eso deben ser corregidos para una lectura de pulsos más estable. Se pueden corregir de dos formas por medio de la electrónica o por el programa como a continuación se describe.

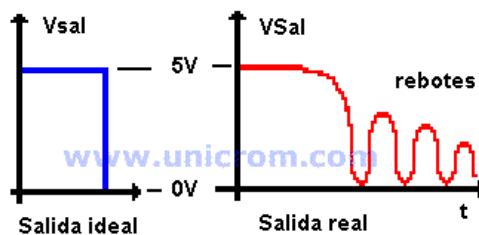


Imagen 31. Salidas de un pulsador. Tomada de [27]

2.8.1.1. Por medio de hardware.

- Colocando un capacitor electrolítico de $10\mu\text{F}$. En la siguiente imagen se muestran las dos formas de conectar el pulsador.

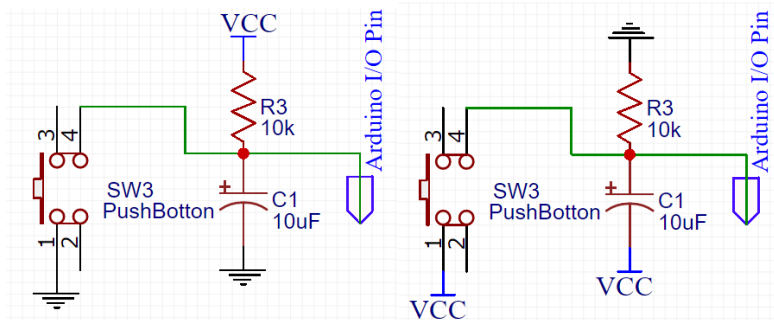


Imagen 32. Resistencia Pull-Up y Pull-Down.

- **Colocando un temporizador 555.**

En la imagen 31 se puede observar que el temporizador 555 entrega a su salida (pin3) un voltaje de nivel alto por un tiempo establecido por la resistencia R1 y el capacitor C1, el tiempo de salida puede variar según los valores que se tengan en R1 y C1. [27]

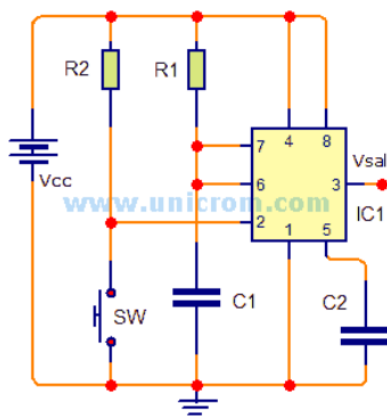


Imagen 33. Circuito anti rebote con 555. Tomada de [27]

2.8.1.2. Por medio de funciones del lenguaje Arduino.

Arduino proporciona dos funciones que ayudan controlar el tiempo de ejecución de instrucciones, a saber: delay y millis las cuales se reseñan en los siguientes párrafos:

➤ Colocando un delay.

La función delay retrasa el programa en milisegundos.

Su sintaxis es delay(ms), donde ms es el parámetro que recibe y son los milisegundos que el programa se va a detener.

La forma de implementarlo con el pulsador sería leyendo la entrada digital cuando el estado cambie de HIGH a LOW o viceversa, dar un retraso de unos milisegundos, en lo personal utilizar esta función no me parece lo más viable, ya que fue probado y aun así había rebotes por parte del pulsador.

➤ Colocando millis.

La función millis devuelve una cantidad en milisegundos, desde que se inicia o ejecuta una acción en el programa.

Su sintaxis en tiempo= millis(); y no devuelve parámetros.

La forma de implementarlo con el pulsador sería leyendo la entrada digital cuando el estado cambie de HIGH a LOW o viceversa, y en ese momento empezar a contar hasta que regrese a su estado de reposo, en ese momento sabremos que se presionó una vez el pulsador.

Aunque algunas opiniones sugieren que la mejor forma de evitar los rebotes sería implementado tanto la forma electrónica y la programada. En opinión de la autora, la programada es la mejor forma de leer las veces que ha sido presionado un pulsador, ya que hay pulsaciones largar y cortas.

2.9. Algoritmo de control para la mano, basado en la Distancia Euclidiana.

El reconocedor de patrones basado en la distancia euclidiana es un algoritmo que consiste en la agrupación de una serie de vectores de acuerdo con un criterio (mínima distancia o similitud).

Generalmente los vectores de un mismo grupo o clúster comparten propiedades comunes. El conocimiento de los grupos puede permitir una descripción sintética de un conjunto de datos multidimensional complejo. [23]

Para aplicar la distancia euclidiana se obtiene la distancia ordinaria entre dos puntos de un espacio, la cual se deduce a partir del teorema de Pitágoras.

Por ejemplo, en un espacio bidimensional, la distancia euclidiana entre dos puntos P1 y P2 de coordenadas cartesianas (x_1, y_1) y (x_2, y_2) respectivamente:

$$dE(P1, P2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Este algoritmo se puede basar en distancias o en particiones.

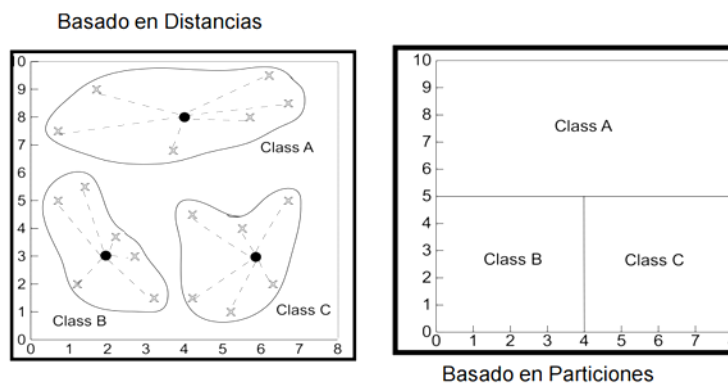


Imagen 34. Formas en que se pueden agrupar los datos. Tomada de [28]

Este algoritmo se utilizó para pruebas, pero no fue funcional porque al momento de mover el brazo, la clasificación de datos, enviados por el sensor de presión, presentaban gran variabilidad. En el capítulo siguiente se detalla los inconvenientes encontrados con este algoritmo.

Debido a los inconvenientes encontrados, en este trabajo se realiza una propuesta de clasificación para el control de los movimientos de la mano y el cual se considera un aporte a la solución del problema y se describirá en el siguiente capítulo.

Después de la consideración de aspectos electrónicos, en el siguiente apartado, se analizarán los diseños 3D de prótesis de mano en cuanto funcionalidad y estética.

2.10. Diseños consultados de prótesis de mano en 3D.

El banco de imágenes o diseños en 3D en el que se buscaron las siguientes prótesis fue Thingiverse¹.

❖ Diseño FA3D Hand².

Diseñada por Jelle ten Kate, es una prótesis de mano impresa con filamento flexible NinjaFlex, es funcional y antropomórfica, se imprime en varias piezas, es ensamblada usando tuercas y pernos estándar, los diseños se pueden descargar en formato STL o facilitan los archivos en SolidWorks para modificar partes del diseño.

Esta prótesis fue pensada para personas con amputación debajo de codo, mueve el dedo pulgar de 0 a 100 grados, es estética, la mecánica con la que funciona se desconoce, no tiene giro de muñeca y puede sujetar cosas pequeñas.



Imagen 35. Prótesis FA3D Hand. Tomada de [29]

❖ Diseño Partial hand prosthesis³.

Diseñada por el usuario llamado 90srobot, esta prótesis es funcional, se imprime en una sola pieza en material ABS o PLA, se describe como fuerte y ligera.

Fue pensada para personas con amputación transcarpal o transmetacarpal, el dedo pulgar es estático, los dedos se accionan con hilos, cuando el usuario flexiona la

¹ Link del banco de datos Thingiverse <https://www.thingiverse.com/> .

² Link de diseño FA3D Hand <https://www.thingiverse.com/thing:1947210> .

³ Link de diseño Partial hand prosthesis <https://www.thingiverse.com/thing:2565845> .

muñeca, se cierran los dedos, es estética y se desconoce si puede sujetar cosas pequeñas, el archivo se puede descargar en formato STL.

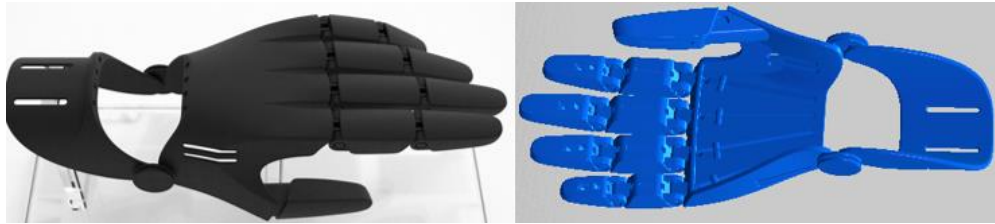


Imagen 36. Partial had prosthesis. Tomada de [30]

❖ **Diseño Ada Robotic Hand⁴.**

Es una mano robótica desarrollada por la empresa Open Bionics, imprimible en filamento flexible, derivada de la mano robótica de Dextrus de Open Hand Project, es de diseño abierto.

Es funcional y estética, para ensamblarse utiliza pernos, la mecánica que utiliza es cuerda como tendones y cinco actuadores lineales a 12v, el pulgar tiene varios grados de libertad, no cuenta con giro de muñeca y puede sujetar objetos pequeños.

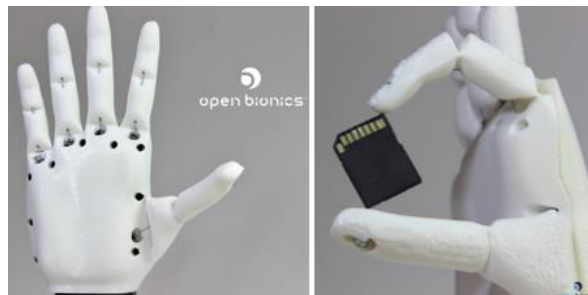


Imagen 37. Ada Robotic Hand. Tomada de [31]

❖ **Diseño Flexy Hand⁵.**

Diseñada por el usuario llamado Gyrobot, es una mano imprimible en filamento flexible, las articulaciones son flexibles, los dedos se pueden activar individualmente, una ventaja que tiene es que los dedos se abren automáticamente cuando el hilo que se utiliza como tendón se va destensando, lo que quiere decir que no necesita resortes

⁴ Link del diseño Ada Robotic Hand <https://www.thingiverse.com/thing:1294517> .

⁵ Link del diseño Flexy Hand <https://www.thingiverse.com/thing:242639> .

o algún mecanismo de retorno, los tendones elásticos ofrecen un agarre adaptativo a objetos irregulares.

Esta mano es funcional y estética, el dedo pulgar es estático, aunque hay 3 modelos de la palma con 3 diferentes posiciones de dedo pulgar, cada dedo se imprime independiente mente en 3 partes, la palma se imprime en una sola pieza, los archivos de descarga están en formato STL.

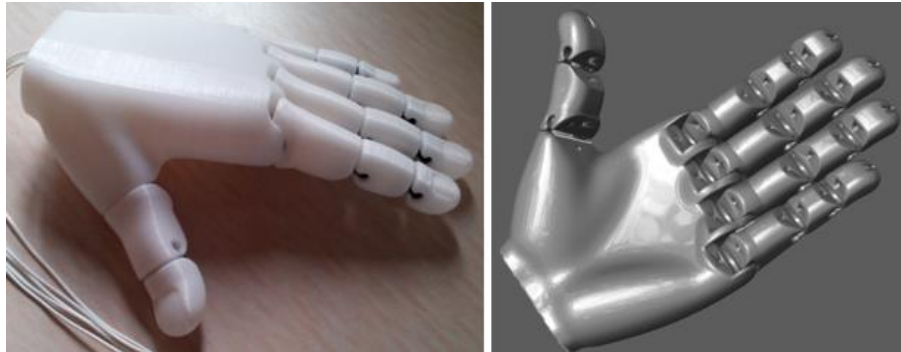


Imagen 38. Flexy Hand. Tomada de [32]

❖ **Diseño Flexy Hand- Fila Flex Remix⁶.**

Diseñada por el usuario llamado Gyrobot, esta prótesis es una versión mejorada de la Flexy Hand mencionada anteriormente, en esta versión las bisagras están ocultas, cada dedo se imprime en una sola pieza en material flexible, usa articulaciones silenciosas y realistas.



Imagen 39. Flexi Hand-Fila Flex Remix. Tomada de [33]

⁶ Link del diseño Flexy-Hand – Filaflex Remix. <https://www.thingiverse.com/thing:754513> .

Para realizar pruebas en este proyecto se utilizó, el diseño Flexi Hand-Fila Flex Remix, sin embargo, al realizar pruebas surgieron inconvenientes, los cuales serán descritos en el próximo capítulo. Con base en el anterior, se eligió el diseño Flexi Hand, pues con base en las pruebas, resultó más adecuado para los objetivos del presente trabajo.

2.11. Actuadores.

Los actuadores son importantes en este proyecto porque proporcionan la fuerza, velocidad, movimiento a la mano robótica. Por lo anterior es importante explicar que un actuador es un dispositivo que genera una fuerza por medio de energía eléctrica o por la quema de un combustible líquido o gaseoso.

Los actuadores se conjuntan en un sistema de actuación el cual se compone de uno o varios actuadores encargados de producir la potencia mecánica de un sistema. [34] En la siguiente figura se muestra la clasificación de actuadores con base a la fuente de energía



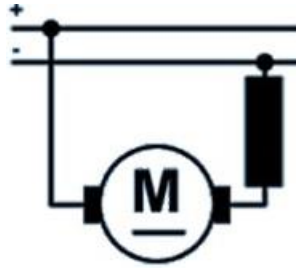
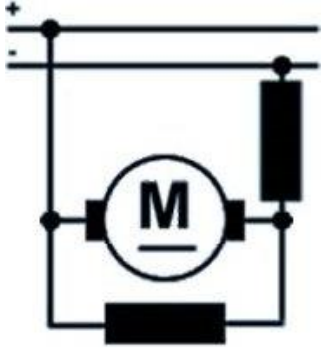
Figura 4. Tipos de actuadores.





Los actuadores eléctricos de corriente directa son los que tienen menor tamaño, por lo tanto, el proyecto se enfocará en estos.

2.11.1. Motores de corriente continua o directa.

Es una máquina que convierte energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético. [35]

Estos motores se dividen en los motores siguientes:

Definición.	Características.	Imagen.
<p>Motor en Serie.</p> <p>En este motor el inducido y el devanado inductor o de excitación van conectados en serie, El voltaje aplicado es constante, mientras que el campo de excitación aumenta con la carga, puesto que la corriente es la misma corriente de excitación. [36]</p>	<p>La potencia es casi constante a cualquier velocidad.</p> <p>Le afectan poco la variaciones bruscas de la tensión de alimentación, ya que un aumento de esta provoca un aumento de la intensidad [36]</p>	 <p><i>Imagen 40. Motor en Serie. Tomada de [36]</i></p>
<p>Motor compound.</p> <p>En este motor la excitación es originada por dos bobinados inductores independientes; uno dispuesto en serie con el bobinado inducido y otro conectado en derivación con el circuito formado por los bobinados: inducido, inductor serie e inductor auxiliar. [37]</p>	<p>Tiene un limitado rango de debilitamiento de campo; la debilitación del campo puede resultar en exceder la máxima velocidad segura del motor sin carga.</p> <p>El motor da un par constante por medio del campo independiente al que se suma el campo serie con un valor de carga igual que el del inducido. [37]</p>	 <p><i>Imagen 41. Motor compound. Tomada de [37]</i></p>

<p>Motor shunt.</p> <p>Cuyo bobinado inductor principal está conectado en derivación o paralelo con el circuito formado por los bobinados inducido e inductor auxiliar. [38]</p>	<p>Su velocidad no disminuye más que ligeramente cuando el par aumenta.</p> <p>Se utiliza en aplicaciones de velocidad constante, como en los accionamientos para los generadores de corriente continua en los grupos motogeneradores de corriente continua. [38]</p>	 <p><i>Imagen 42. Motor shunt. Tomada de [38]</i></p>
<p>Motor sin escobillas.</p> <p>Este motor no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor. [39]</p>	<p>Son de los motores más comunes, rentables y ligeros.</p>	 <p><i>Imagen 43. Motor sin escobillas. Tomada de [39]</i></p>
<p>Motor Paso a Paso.</p> <p>Es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados (paso o medio paso) dependiendo de sus entradas de control. [40]</p>	<p>Es muy preciso.</p> <p>Existen 3 tipos fundamentales de motores paso a paso: el motor de reluctancia variable, el motor de magnetización permanente, y el motor híbrido.</p>	 <p><i>Imagen 44. Motor paso a paso. Tomada de [40]</i></p>
<p>Servomotor.</p> <p>tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango</p>	<p>Está conformado por un motor y un circuito de control. También potencia proporcional para cargas</p>	


de operación, y mantenerse estable en dicha posición.	mecánicas. Tiene un consumo de energía reducido.	<i>Imagen 45. Servomotor. Tomada de [41]</i>
Motorreductor. Es un reductor de velocidad con un motor directamente conectado.	Son compactos en tamaño. Son mecánicamente más simples que otra combinación de motores y reductores. Los hay de diferentes tamaños.	 <i>Imagen 46. Micromotorreductor. Tomada de [42]</i>

Tabla 2. Motores de corriente continua.

Con base en las características reseñada en la tabla 2, se seleccionaron los micromotorreductores y se prosiguió a analizar los mecanismos que mejor se acoplarán al proyecto.

2.12. Mecanismos.

Un mecanismo es un conjunto de elementos rígidos, móviles entre sí, que transforman el movimiento producido por una fuerza motriz en un elemento conducido. Por la forma de transmitir el movimiento, se generan grupos de mecanismos.

2.12.1. Grupos de mecanismos.

- Mecanismos de transmisión de movimiento. El elemento de entrada y el conducido tiene el mismo movimiento.
- Mecanismos de transformación del movimiento. El elemento motriz y el conducido tiene distinto movimiento. En este tipo de mecanismos se distinguen tres tipos de movimiento.
- Movimiento circular o rotatorio, como el de una rueda.
- Movimiento lineal, es decir en línea recta y de forma continua.
- Movimiento alternativo. Es un movimiento de ida y vuelta, de vaivén. Como el de un péndulo. [43]

En la figura 5 se mencionan los elementos que forman a los grupos de mecanismos referidos.



Figura 5. Tipos de mecanismos.

Los mecanismos que se utilizaron para realizar pruebas en este proyecto fueron.

2.12.2. Mecanismo Twisted String.

El primer mecanismo que se pensó utilizar con los motores anteriormente mencionados fue el Twisted String, es simple, barato, ligero y tiene alta relación de transmisión, se conocía desde la antigüedad, tenía diferentes usos, por ejemplo, en catapultas o en la actualidad hasta en juguetes. Para que funcione solo se necesita un motor y cuerda.



Imagen 47. Uno de los usos del Twisted String.

Concepto del mecanismo Twisted String.

Se amarran dos hilos uno a cada lado del eje del motor, cuando este empieza a funcionar, se enredan los hilos, lo que hace que su longitud se contraiga y tire una carga de forma lineal.

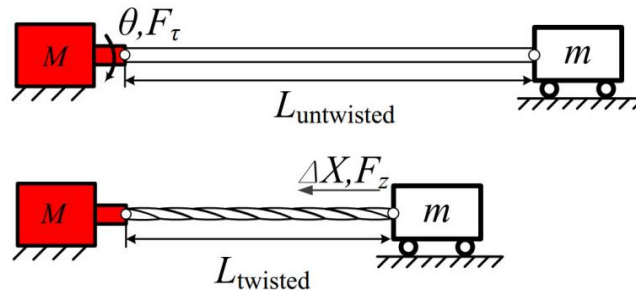


Imagen 48. Funcionamiento del Twisted String. Tomada de [44]

Este mecanismo a pesar de ser simple y económico, con un motor de torque bajo puede tener mucha fuerza para levantar objetos.

El mecanismo se ha implementado en manos robóticas o exoesqueletos de codo, como tendones para los dedos o brazo.

Desventajas.

A pesar de que con este mecanismo se puede construir un robot de bajo costo, su ciclo de vida es corto a comparación de otros mecanismos, requieren una calibración muy precisa, para movimientos precisos, para que pueda regresar a su estado original, requiere de dos motores opuestos o mecanismos de retorno de resorte.

2.12.3. Mecanismo impulsado por tendón.

Este mecanismo es simple, barato, ligero. Lo usan la mayoría de las prótesis. El concepto de cómo funciona es básico, para que un dedo se flexione, el motor gira y un carrete enrolla un hilo que funciona como tendón del dedo, el tendón sale del actuador paralelo a su eje, lo que provoca que el movimiento sea lineal.

Desventajas.

Si el hilo que trabaja como tendón no resiste o se desgasta se debe de remplazar, por lo que tiene un tiempo de vida corto, la relación de transmisión que tiene es el torque que tiene el actuador.

Teniendo el motor y el mecanismo a implementar en el proyecto, fue necesario saber y controlar su posición, por lo que se analizaron diferentes encoders para seleccionar uno. En la siguiente sección se describirán.

2.13. Encoders.

Es un sensor que por lo general se añaden a un motor. Convierte el movimiento mecánico en pulsos digitales que pueden ser interpretados por un control integrado electrónico. El propósito de estos sensores es la dirección del movimiento, control de la posición del eje y en algunos casos la adecuación de la velocidad. Existen diferentes tipos de encoders como se muestra en la figura 6.

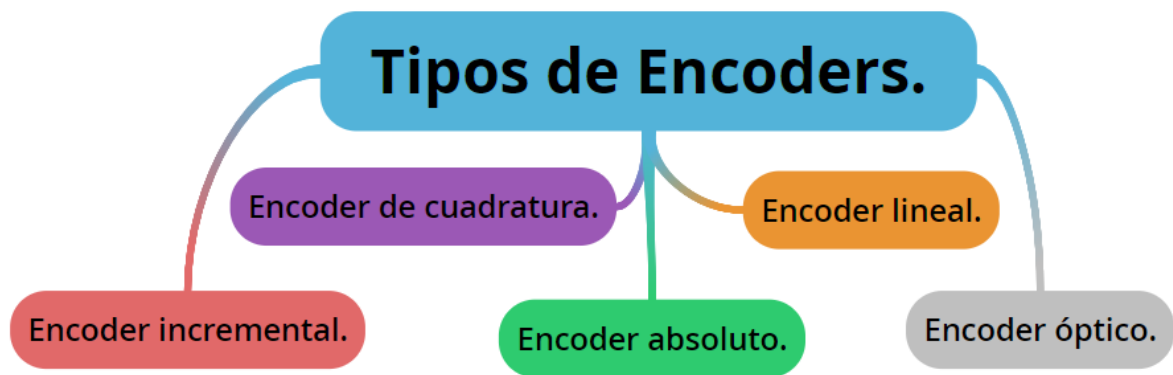


Figura 6. Tipos de encoders.

A continuación, se describirán los mostrados en la figura anterior:

➤ Encoder óptico.

Está conformado por un emisor y receptor infrarrojo y un disco que dispone de secciones opacas sobre la cara del disco, este va montado en el eje del motor entre el emisor y receptor, al girar el motor, el receptor produce señales de pulso y un dispositivo controlador determina el ángulo exacto del eje. [45].

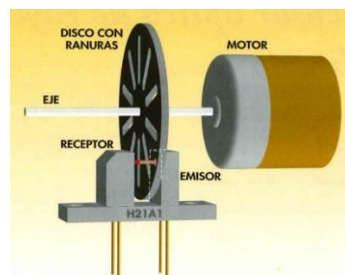


Imagen 49. Encoder óptico. Tomada de [45].

➤ **Encoder lineal.**

Este sensor cuenta con una escala graduada para determinar su posición, pueden ser absolutos o incrementales.



Imagen 50. Encoder lineal. Tomada de [46]

○ **Encoder absoluto.**

Estos encoders ofrecen un código único para cada posición y se dividen en dos grupos, los encoder de un solo giro y de giro múltiple.



Imagen 51. Encoder absoluto de un solo giro. Tomada de [47]

○ **Encoder incremental.**

Es un tipo de encoder óptico que determina el ángulo de posición realizando cuentas incrementales, por lo tanto, cada posición es completamente única. [48]

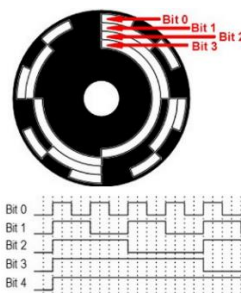


Imagen 52. Encoder incremental. Tomada de [48]

Después de investigar cómo determinar la posición en la que estaba el motor, algo fundamental para que la mano tuviera precisión en sus movimientos, se tuvo que escoger un encoder.

Al tener todos los elementos electrónicos que conformarían a la mano fue necesario diseñar un circuito, para ensamblarlo de forma permanente al prototipo.

2.14. Circuitos.

Un circuito electrónico se rige bajo los mismos principios de un circuito eléctrico⁷. Contiene dispositivos tales como transistores, válvulas y otros elementos electrónicos, pueden hacer funciones complejas utilizando las cargas eléctricas, se clasifican en tres grupos como se muestra en la figura 7. [49]

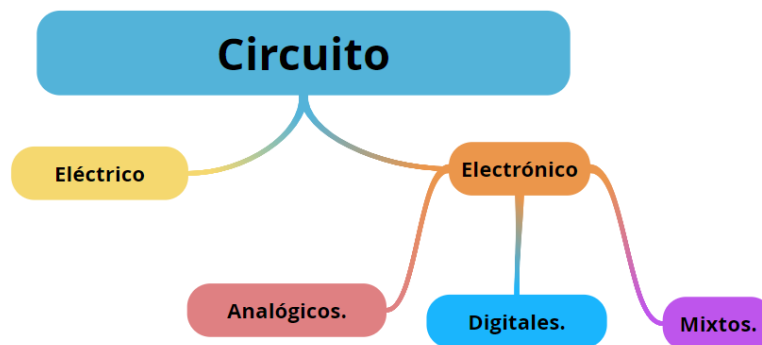


Figura 7. Tipos de circuitos.

➤ Circuitos analógicos.

Son aquellos en los que las señales eléctricas varían continuamente para corresponder con la información representada por ejemplo radios, amplificadores de potencia, etc.

➤ Circuitos digitales.

Son en los que las señales eléctricas obtienen unos valores discretos para mostrar valores numéricos lógicos que representes la información que procesan, por ejemplo, calculadoras, microprocesadores, etc.

⁷ Un circuito eléctrico es la conexión de dos o más componentes (resistencia, fuentes, cables, etc.) que contiene al menos una trayectoria cerrada.

➤ **Circuitos mixtos.**

Estos circuitos contienen elementos tanto analógicos como digitales, por ejemplo, convertidor analógico a digital o viceversa.

Se seleccionó una de las placas más pequeñas que tiene Arduino para ensamblarse en el circuito, a saber; pro-mini el cual se detalla en la siguiente sección.

2.15. Placa Arduino pro mini utilizada en el circuito de la mano.

Como se comentó párrafos arriba (véase sección 2.7), se hicieron pruebas con el Arduino nano; sin embargo, debido al poco espacio que tiene la mano, se buscó realizar un circuito pequeño y por eso se eligió el Arduino pro mini.

Existen dos versiones de esta placa la de 3.3v y 8MHz y otra de 5v y 16MHz para este proyecto se ocupó la de 5v y 16MHz, esta placa está destinada a instalaciones semi-permanentes.

➤ **Características.**

Microcontrolador ATmega168.

Voltaje de funcionamiento 5v.

Voltaje de entrada de 5v a 12v.

Pines analógicos 6.

Pines digitales de E/S 14(6 de los cuales tiene salida PWM).

Intensidad máxima por E/S 40mA.

Memoria Flash 16KB.

Velocidad de reloj de 16MHz.

Tamaño 2 x 3 cm.



Imagen 53. Arduino mini-pro.

Por lo general un led sirve para indicar diferentes cosas, por ejemplo, que hay paso de corriente, pero para este proyecto se utilizó para saber en qué movimiento se encuentra la mano, el cual es un aporte del trabajo de tesis.

2.16. Led RGB ánodo común.

Un led RGB tiene los colores rojo, verde y azul, siendo su común el ánodo o positivo (5v), también existen led RGB de cátodo común.

Los leds RGB tiene una lente difusa de 8mm, lo que hace que sus colores se muestren de forma homogénea y no como un punto luminoso, al alimentar los colores, la corriente con que se alimente debe ser menor de 20mA, la longitud de onda a la tonalidad rojo es de 625nm, verde 520nm y azul de 465nm.

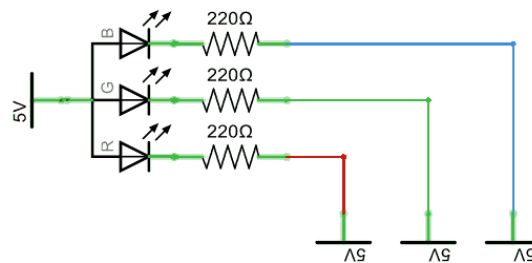


Imagen 54. Montaje de led RGB ánodo común [50].

Para controlar el led RGB y poder sacar diferentes tonalidades de colores, se utilizaron las salidas PWM del Arduino nano, las cuales son los pines digitales 3,5,6, 9,10 y 11.

La señal PWM (Pulse-width modulation) señal de modulación por ancho de pulso.

Esta señal maneja una cantidad de pulsos por frecuencia (hertz) de tiempo (estado on/off) por segundo.

Existe un parámetro asociado o que define a la señal PWM, denominado ‘Ciclo de trabajo’, este permite determinar el porcentaje de tiempo que el pulso está activo durante un ciclo.

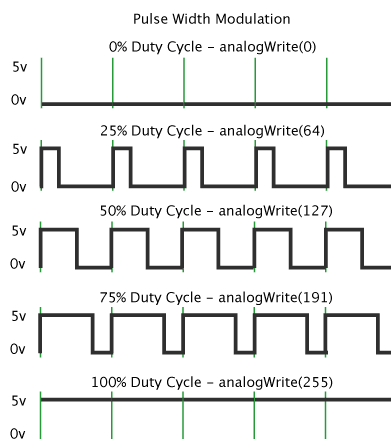


Imagen 55. Ciclos de modulación por ancho de pulso. Tomada de [51]

En pocas palabras es una señal de frecuencia de 490 HZ aproximadamente y sólo permite cambiar el ciclo o el tiempo de pulso activo (on) o inactivo (off), utilizando la función ‘analogWrite();’ en Arduino.

Una de las cosas más importante es la forma en que se alimentara al circuito, ya que sin esto nada funcionaria.

2.17. Formas de Alimentar un circuito.

Para alimentar circuitos se pueden utilizar baterías o transformadores, éstos siempre especifican dos cosas el voltaje y el amperaje que proporciona por hora.

Todos los Arduinos tiene un regulador de tención, que es un componente que convierte el voltaje con que se alimenta la placa a 5v o 3v (dependiendo de la placa).

Formas de alimentar Arduino.

➤ **Adaptador de corriente.**

Los hay de tres tipos de corriente alterna, directa o convertidores, es un tipo de alimentación externa, encerrada en lo que aparenta ser una clavija de corriente de gran tamaño.

Los parámetros que hay que fijarse es el voltaje que proporcionan, amperaje, regulación de voltaje, tipo de conector y polaridad del conector.



Imagen 56. Adaptador de corriente.

➤ **Pilas AA.**

Estas pilas proporcionan 1.5V, se pueden colocar en serie hasta que se proporcione el voltaje necesario o en paralelo para aumentar el amperaje proporcionado, no es

recomendable conectar una pila de 9v ya que, si la fuente que proporciona energía es mayor a 7v, por que el Arduino se comenzara a calentar.



Imagen 57. Pilas AA.

➤ **Baterías de ion de Litio.**

Es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. Estas baterías son usadas por celulares o tablets, son ligeras, tienen gran capacidad energética y resistencia a la descarga.



Imagen 58. Batería de ion de Litio.

➤ **Baterías LiPo.**

Baterías de polímero de litio son recargables, se compone de varias células secundarias idénticas en paralelo para aumentar la capacidad de la corriente, es por eso que tienen menor tamaño y mayor voltaje y potencia.



Imagen 59. Batería LiPo.

➤ **Fuente de alimentación ATX2 para PC.**

Estas se pueden volver fuente regulable, suministra corriente directa y se puede utilizar para hacer pruebas o para conectar un proyecto permanentemente que no necesite moverse, tiene 8 conectores y cada uno suministra diferentes voltajes y amperajes, se tiene que ver las especificaciones que viene pegadas en la fuente, para saber que conector es más viable para el proyecto.



Imagen 60. Fuente de alimentación de PC.

Para efecto de hacer pruebas se utilizó una fuente como la arriba comentada. Para una aplicación estética, se recomienda una pila LiPo. Una de las últimas partes del proyecto, consistió en impresión 3D de la mano, y aunque parece fácil, hay que ajustar muchas variables para que una pieza quede perfectamente impresa. Entre más variables se ajusten se puede economizar material y una pieza puede quedar más estética. El proceso se detalla en la siguiente sección.

2.18. Impresión 3D.

Después de finalizar con el diseño y ver que todo funcionaba perfectamente se prosiguió a imprimir. Se descargaron 3 archivos en formato STL que fueron, la mano, los dedos y las falanges.

Se configuraron los archivos STL en CURA el cual es un software que permite generar archivos con extensión gcode. El gcode es un lenguaje que contiene toda la información necesaria para crear una impresión en 3D (comandos que interpreta el programa de la impresora y lo traduce en movimientos y/o acciones).

Para ilustrar lo anterior, se presenta el siguiente ejemplo, el cual corresponde a una línea de gcode.

11 G1 F900 X197.600 Y29.900 E19.82400

La anterior línea tiene la siguiente interpretación.

11 => Indica la línea del código y es usado como referencia.

G/M => El texto en azul indica si es un comando G o M (dependiendo de la impresora para la cual se allá configurado).

F=> Especifica la velocidad.

X/Y/Z=> Especifica los movimientos en los ejes.

E=>Cantidad de material que expulsa el extrusor.

2.18.1. Configuración en CURA.

Se utilizó la configuración avanzada para generar el gcode ya que permite una impresión más rápida y economiza el filamento. En los párrafos siguientes se describen algunos parámetros de la configuración.

- Calidad.



Imagen 61. Calidad.

Entra menor sea la calidad menor es el tiempo de impresión, lo que implica que la calidad de la figura baja. Por eso es recomendable dejar la altura de capa de 0.1 a 0.3, donde 0.1 es la calidad máxima.

- Cascara.

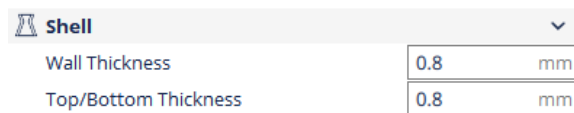


Imagen 62. Cascara de la pieza.

Grueso de la pared, espesor superior e inferior, se refiere al grosor que pueden tener las paredes de la estructura.

- Densidad de relleno.

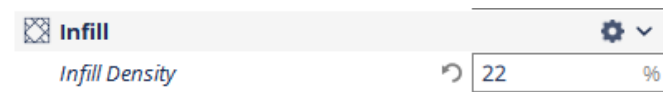


Imagen 63. Relleno.

Aquí se especifica el porcentaje con el que se imprime. Entre menor sea el porcentaje, más liviana quedará la pieza, pero también más frágil.

- **Material.**



Imagen 64. Variables del Material.

- Temperatura de impresión. Se especifica la temperatura con lo que se derrite el filamento a utilizar; la temperatura por lo general es especificada por el fabricante de filamento.
- Temperatura del plato de construcción. Es la temperatura que tendrá el plato en donde se imprima la pieza, varía según el material que se esté utilizando.
- Diámetro. Es el diámetro del filamento que se está utilizando.
- Fluido. Es el fluido que expulsara el extrusor, por lo general se especifica 100%.
- Permitir la retracción, permite la retracción cuando se mueve en un área donde no se tiene que imprimir.

- **Velocidad.**

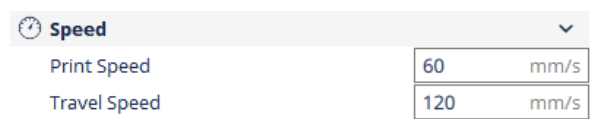


Imagen 65. Velocidad de impresión y desplazamiento.

- Velocidad de impresión, por lo general se especifica 60mm/s ya que si fuera más rápido no se adheriría el material.
- Velocidad de desplazamiento, se deja en 120 mm/s porque es cuando se mueve en partes donde no imprime.

- Enfriamiento.



Imagen 66. Enfriamiento.

Habilitar el enfriamiento de la impresión, es bueno dejar habilitados los ventiladores para que el material seque más rápido y no se deformen las piezas impresas.

- Soporte.

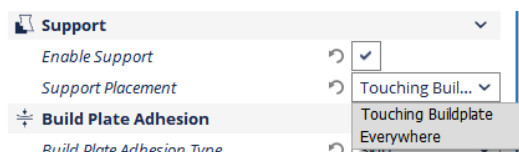


Imagen 67. Soporte.

Cuando se habilita el soporte es porque las piezas se imprimen en un grado de inclinación o hay partes de la pieza que están en el aire. Se tiene la opción de que el soporte sea del plato de construcción a la pieza o en cada hueco que se encuentre en la pieza agregando también el plato de construcción.

- Cama de adhesión.

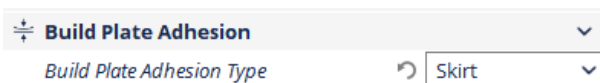


Imagen 68. Cama de adhesión.

Existen 3 tipos de cama de adhesión, que es skirt o falda, brim o borde y raft.

- Formas de imprimir especiales.

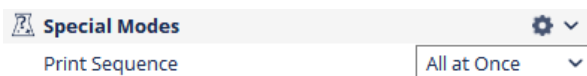


Imagen 69. Modos Especiales.

Impresión de secuencia. tiene dos opciones imprimir si es que se tiene más de una pieza todas a la vez o se puede seleccionar el primero imprimir una y después las demás.

Todo lo anterior descrito, constituye una forma básica de la configuración avanzada, ya que CURA permite modificar hasta 200 variables, para impresiones con más precisión y para usuarios con más experiencia.

Después de configurar y generar el gcode se procesa el archivo en REPETIER HOST que es un software que traduce los archivos gcode y permite visualizar línea por línea la impresión en un plato o cama de impresión virtual.

Lo anterior es de utilidad ya que permite ver errores que no se pueden ver al momento de diseñar. Este software soporta 16 extrusores, diferentes soportes e impresión de múltiples partes.

Al verificar que el modelo se imprimiría correctamente sin fallas, se mandó a imprimir. La impresora que se utilizó fue una AnetA8, que es de las impresoras más económicas que hay en mercado, una de sus ventajas es que es modificable y con esto se puede mejorar. Su desventaja es al momento de calibrar ya que tiene que ser manual.

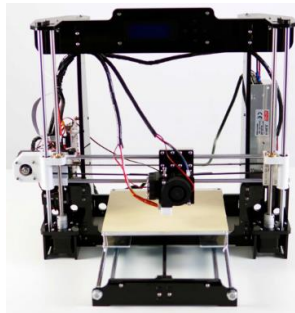


Imagen 70. Impresora 3D Anet A8.

Los materiales de impresión son otra parte fundamental para que una pieza quede presentable, ya que existes diferentes filamentos y diferentes marcas, que no se trataran en este trabajo ya que se utilizó filamento genérico.

2.18.2. Materiales de impresión.

El material de los filamentos que se utilizó fueron PLA genérico, para imprimir la mano y los dedos y filamento flexible genérico, para imprimir las falanges. El PLA, ácido poli-láctico, es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico, que se hace a partir de recursos renovables al 100%, como son el maíz, la remolacha, el trigo

y otros productos ricos en almidón. Este ácido tiene muchas características equivalentes e incluso mejores que muchos plásticos derivados del petróleo, lo que hace que sea eficaz para una gran variedad de usos. [52]

Existe también Filamento Flexible el cual es un compuesto plástico al que se le añade un agente químico (plastificante), para aumentar su flexibilidad, reducir la temperatura de fundido y la viscosidad que permite que las impresoras 3D puedan fundirlo y darle la forma deseada, quedando el producto final como una pieza consistente que presenta como propiedad principal a destacar su flexibilidad. Cualidad de la que carecen otros compuestos como puede ser el PLA o el plástico de las bobinas ABS si están en estado puro. [53]

En este trabajo se utilizaron filamentos PLA y Flexible.

3. Metodología Propuesta.

La metodología propuesta consiste en: 7 segmentos, donde se explica las pruebas realizadas con los sensores, actuadores, mecanismos, la selección de un diseño 3D, la creación del circuito, el desarrollo del programa que controla los movimientos de la mano y conclusiones.

3.1. Recolección de Información.

Esta sección comprende la introducción, la entrevista y las conclusiones, mismas que se desarrollan en los siguientes puntos.

3.1.1. Introducción a la sección.

Antes de iniciar un proyecto, se considera importante conocer qué esperan las personas del mismo (si es que el proyecto va enfocado a un usuario) así que aparte de empezar una investigación acerca de los músculos que hay en el antebrazo, se realizó una serie de preguntas a una persona que hace poco perdió el miembro superior izquierdo, ya que en internet hay muy poca información acerca de cómo funciona o que movimientos tienen los músculos de una persona con amputación transradial.

Se buscaba saber si la persona que tenía un corte transradial puede realizar tareas como cerrar o abrir la mano y producir los movimientos de la mano. Aparte, saber qué es lo que esperan de una prótesis, y por ello se realizó una entrevista.

3.1.2. Entrevista.

La entrevista se realizó el 18 de abril del 2017, en las instalaciones de Robótica Crya al señor Adoná Leyva, una persona que, por un accidente laboral, se tuvo que someter a cirugía ortopédica; se le realizó un corte transradial en el miembro superior izquierdo.

Las preguntas fueron las siguientes:

➤ ¿Aún siente que tiene su mano? ¿Siente dolor o algo parecido?

“A veces, sí siento que tengo aun mi mano, por el dolor no siento dolor, pero si la punta del muñón llega a chocar fuertemente con algo si es bastante doloroso, porque los huesos del antebrazo están sueltos y si choco con algo es como si me machucara fuertemente la piel que queda entre el objeto y mis huesos” (sic).

➤ ¿Qué movimiento puede realizar con el antebrazo?

El entrevistado colocó sus brazos en paralelo frente a él y contestó:

“puedo mandar las mismas indicaciones que mando a mí brazo que si tiene mi mano, puedo mandar que cierre mi mano (puño) y mantener esa ‘postura’, o puedo mandar que se habrá mi mano” (sic).

Preguntas referentes a las expectativas de una prótesis.

➤ ¿Considera que una prótesis debe ser estética?

“Claro, entre más estilizada este la prótesis, más podría pasar desapercibido, hasta si es posible podría hacerse algo que simule que es piel humana, como digo entre más pase uno desapercibido, mejor. Aparte de que no debe ser muy pesada” (sic).

➤ ¿Qué espera del funcionamiento de una prótesis?

“Pues que se moviera igual que una mano humana, que sea fácil de poner, casi como un guante que sea de poner y quitar, sin cables, que pueda girar la mano (giro de muñeca), para que así sea más fácil sujetar las cosas, que pueda tomar cosas pequeñas, pero al mismo tiempo tenga la suficiente fuerza para tomar cosas más pesadas, que no use pilas, que sea fácil de cargar las baterías y que duren mucho tiempo” (sic).

Nota.

Cabe destacar que el entrevistado ya tenía aproximadamente un año de que se le había realizado el corte transradial. En la imagen siguiente, se hace énfasis en el músculo braquiorradial señalado por el círculo amarillo y el cual es importante porque fue en el que más se observó movimiento.



Imagen 71. Antebrazo del entrevistado.

3.1.3. Conclusión a la sección.

La entrevista ayudó a saber qué movimiento puede hacer una persona que ha sufrido una amputación de miembro superior por debajo de codo, lo cual resultó muy interesante al observar que, sí puede mandar las señales de abrir y cerrar la mano, algo que será útil en este proyecto.

Se observó que, al mandar la señal de cerrar la mano, en el brazo donde ésta fue amputada, el movimiento del músculo braquiorradial (señalado en la imagen) es exagerado ya que recibe y acumula toda la fuerza mandada, porque no tiene una extremidad (mano) a dónde transmitirla. Es como la persona entrevistada comentó, “nuestro brazo es como un circuito” y tiene razón. Ya que en el brazo donde tiene mano, el movimiento del músculo braquiorradial es muy leve porque la fuerza que manda se transmite hasta la mano.

3.2. Procesamiento de la Señal y Programa de Control.

Esta sección comprende las pruebas, calibración de los sensores y la explicación del funcionamiento de los programas desarrollados para procesar el movimiento del musculo braquiorradial.

3.2.1. Introducción a la sección.

En este segmento se muestra las pruebas que se realizaron con los sensores, las ideas que se tuvieron al construir un sensor, los resultados que se obtuvieron con estos, ya

que con base en los resultados arrojados se seleccionó el que mejor se adaptó cuando se ejercía presión en el músculo braquiorradial.

3.2.2. Materiales.

Para realizar las pruebas con los sensores fue necesario adquirir:

- Una placa Arduino Nano.
- Resistencias de 100, 1.5 k y 10 k Ohms.
- 10 leds de diferentes colores.
- Cables jumpers, macho-hembra, macho-macho, hembra-hembra.
- 2 fotorresistencias.
- 1 sensor de presión.
- 1 sensor flexible.
- 2 pulsadores.
- 1 protoboard.

3.2.3. Fotorresistencia.

En un primer intento se utilizó una fotorresistencia porque se creyó que el movimiento del músculo braquiorradial junto con un brazalete, al que se le adaptó un led, podían llegar a producir un tipo de sombra y así generar diferentes lecturas análogas.

La construcción del sensor se realizó con 4 placas de madera de 2cm de ancho por 1.5cm de alto y 3mm de ancho que fueron cortadas con una cortadora laser.



Imagen 72. Sensor con led y fotorresistencia.

Se realizó un brazalete con una tira de estireno de 5mm de ancho, se adaptó para que el sensor quedara cerca de la piel del músculo braquiorradial. En la siguiente imagen se muestra el brazalete diseñado.



Imagen 73. Adaptación del sensor al brazalete.

El circuito para probar este sensor fue el siguiente:

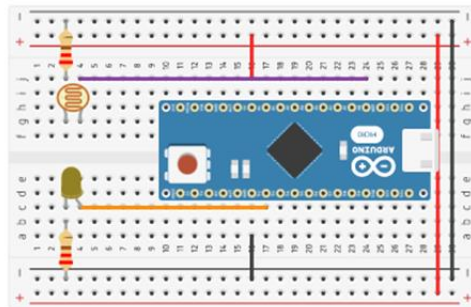


Imagen 74. Circuito con fotorresistencia.

Las lecturas no fueron las esperadas, variaban mucho y no se encontró un patrón. La idea del sensor no funcionó adecuadamente para censar el movimiento del músculo braquiorradial, por lo tanto, el sensor fue descartado. En la imagen 75 se observa una gran variabilidad de los valores adquiridos.

```

COM7
LDR =0
LDR =1023
LDR =0
LDR =1023
LDR =628
LDR =0
LDR =1023
LDR =0
LDR =555
LDR =1011
LDR =0
LDR =1023
LDR =31
LDR =0
LDR =1023
LDR =0
LDR =1023
LDR =308
LDR =0
LDR =1023

```

Imagen 75. Lecturas enviadas de la Fotorresistencia.

3.2.4. Sensor de Flexión.

En un segundo intento, se utilizó un sensor de flexión el cual fue adherido en la piel en donde se localiza el músculo braquiorradial. Se tenía la idea de que entre más se

ejerciera fuerza más iba a subir el músculo y por lo tanto el sensor de flexión se doblaría más, pero las lecturas que mandaba eran iguales o peores a la fotorresistencia. Se tuvo que acondicionar el sensor.



Imagen 76. Sensor flexible pegado en la piel en el músculo braquiorradial.

Para calibrar al sensor flexible se utilizó un LM393 que es un acondicionador operacional y al mismo tiempo un puente de Wheatstone con tres resistencias de 4.7 K ohms, siendo la cuarta el sensor flexible (que fue la resistencia que se debía de ajustar), las mediciones se pudieron ver con las lecturas que mandaba de Arduino.

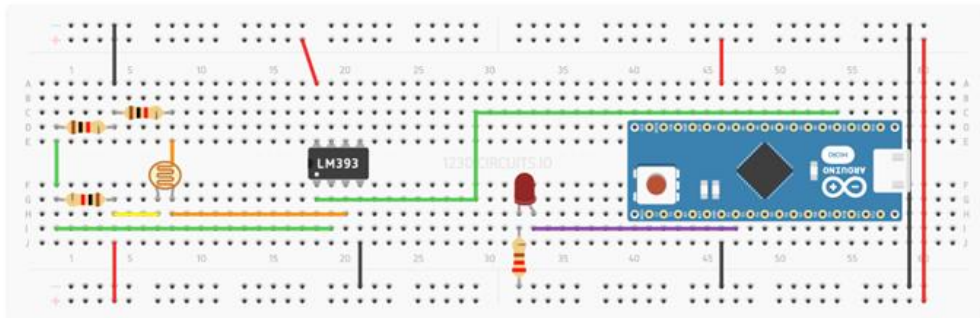


Imagen 77. Simulación de circuito de puente de Wheatstone y amplificador LM393.

Nota: Se colocó una fotorresistencia en lugar del sensor de presión, porque el simulador no contaba con este.

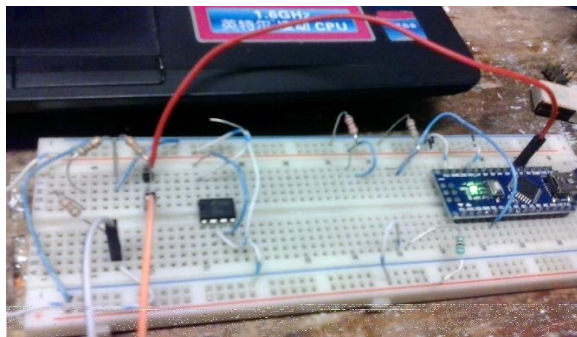


Imagen 78. Circuito implementado de la imagen anterior.

Las lecturas del sensor flexible se estabilizaron sacando un promedio de cada 10 lecturas censadas y controlándolo de manera manual. Además de lo anterior, es conveniente utilizar el acondicionador operacional, el puente de Wheatstone y el promedio de cierto número de lecturas que se almacenen en un arreglo.

Como este sensor es impreciso y para obtener una precisión se requieren cosas tanto electrónicas como de software, se descartó para este proyecto. La imagen siguiente muestra la no estabilidad de las lecturas.

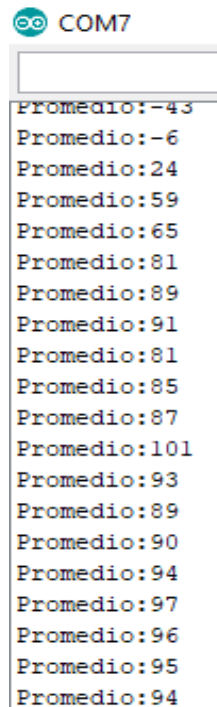


Imagen 79. Lecturas del sensor Flexible.

3.2.5. Sensor de Presión.

El sensor de presión parecía ser hasta ahora la mejor opción. Se pensó que se podía censar la presión ejercida en el músculo braquiorradial. Para adaptar el sensor se hizo un brazalete de pet y se construyó un tipo de tope que se colocaría entre el sensor y el antebrazo. para su elaboración se ocupó la cortadora láser y un diseño básico en AutoCAD, los materiales a utilizar fueron estireno y un pequeño círculo de madera de 3mm de ancho.



Imagen 80. Tope de estireno y madera.

Al adaptar todo al brazalete, quedó de la siguiente manera.

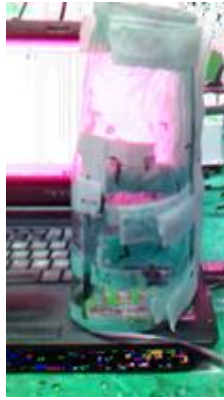


Imagen 81. Tope y sensor adaptado a brazalete de PET.

Se realizó un circuito para probar el sensor de presión el cual se muestra en la siguiente imagen.

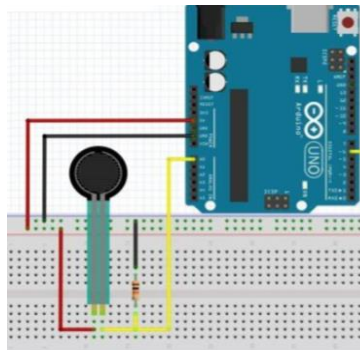


Imagen 82. Circuito del sensor de presión.

Las lecturas que mando este sensor fueron más estables que los anteriores. No cuenta con gran precisión, por esa razón se pensó en implementar un algoritmo de clasificación o agrupamiento, según como se había pensado que quedarían los movimientos de la mano.

Se pensaban tener de 5 o 6 movimientos diferentes para la mano, por esa razón se pensó desarrollar el algoritmo de clasificación basado en la distancia euclidiana, ya que es sencillo y las lecturas se podían agrupar en clases. En siguiente imagen se puede observar las lecturas provenientes del correspondiente sensor.

```
COM7
SensorPre=1
SensorPre=0
SensorPre=0
SensorPre=5
SensorPre=0
SensorPre=13
SensorPre=127
SensorPre=216
SensorPre=247
SensorPre=270
SensorPre=294
SensorPre=316
SensorPre=349
SensorPre=381
SensorPre=430
SensorPre=492
SensorPre=539
SensorPre=586
SensorPre=640
SensorPre=667
SensorPre=705
SensorPre=731
```

Imagen 83. Lecturas del sensor de presión.

3.2.5.1. Sensor de presión y distancia euclidiana.

El programa que se desarrolló se basa en la mínima distancia y para ver si el código funcionaba correctamente se realizó el siguiente circuito.

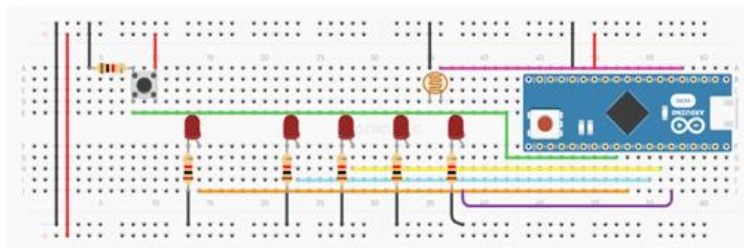


Imagen 84. Circuito implementado con el sensor de presión y distancia euclidiana.

La idea de implementar este circuito era que el usuario presionara el pulsador para programar sus 5 centroides, según la presión que se ejercía en el sensor, para saber

que centroide obtendría las lecturas, se contaba con un led (cercano al pulsador) el que parpadeaba una vez y esto indicaba que se tenía un segundo para para presionar su antebrazo y programar el primer centroide, ese mismo led parpadeaba dos veces e indicaba que tenía un segundo para ejercer presión y que el programa tomara las lecturas del segundo centroide. El ciclo seguía así hasta llegar a 5 centroides programa y guardaba las lecturas del sensor en una matriz de 11 por 11. Se sacaba el promedio de las columnas de la matriz y se generaba un centroide.

Cuando se tenían los 5 centroides el programa empezaba a obtener las lecturas del sensor y empezaba a agrupar en clases según la distancia más corta, comparando los 5 centroides, la salida se podía observar con los leds. Por ejemplo, si el arreglo obtenido pertenecía al centroide 1 se prendía el led que está más cerca de la placa Arduino; si pertenecía al centroide 2 se prendía el segundo led y así sucesivamente hasta el centroide 4. Cuando el arreglo estaba en el centroide 5 todos los leds encendían; esto se hizo ya que si funcionaba se podían sustituir los leds por servomotores, para después hacer el diseño de la mano robótica y cada servo simulara el movimiento de los dedos. El programa que se utilizó para implementar el algoritmo descrito se detalla a continuación:

➤ Programa.

Se declara el número de lecturas de muestra para cada clase (en este caso 5 clases).

```
const int numReadings = 11;
int readings[numReadings]; //={0,0,0,0,0};
```

1. Las muestras se almacenan en una matriz.

```
for(int i=0; i<numReadings; i++){
for(int j=0; j<numReadings; j++){
  ResRead = analogRead(AnalogPin); // La Resistencia es igual a la lectura del sensor (Analog
  matriz[i][j]= analogRead(ResRead);
}
}
```

2. Se calcula el promedio de cada columna de la matriz.

```
//se va a sacar el promedio para sacar una clase
for(n=0; n<numReadings; n++){//j
for(m=0; m<numReadings; m++){//i
  suma=suma+matriz[m][n];
}
promedio=suma/numReadings;
```



```

if (D == d1_1)//clase1
{
  digitalWrite(pinLed1, HIGH);Serial.println("Es de la clase1");
}
else if (D == d2_1)//clase2
{
  digitalWrite(pinLed2, HIGH);Serial.println("Es de la clase2");
}
else if (D == d3_1)//clase3
{
  digitalWrite(pinLed3, HIGH);Serial.println("Es de la clase3");
}
else if (D == d4_1)//clase4
{
  digitalWrite(pinLed4, HIGH);Serial.println("Es de la clase4");
}
else if (D == d5_1)//clase5
{
  digitalWrite(pinLed1, HIGH);
  digitalWrite(pinLed2, HIGH);
  digitalWrite(pinLed3, HIGH);
  digitalWrite(pinLed4, HIGH); Serial.println("Es de la clase5");
  //delay(3000);//cuando tenga los servos hay que quitar esto
  delay(3000);
}
}

```

Este algoritmo fue funcional, sólo que se tuvo un problema. A saber, las pruebas se habían realizado con la mano siempre apuntando hacia enfrente, al momento que se extendía a otra dirección, las lecturas tendían a variar, porque el brazo cambiaba de posición y aunque se aplicara la misma fuerza programada para los centroides, el cálculo de la distancia variaba. Así que se tuvo que pensar en otra idea de cómo censar el movimiento del musculo y en otro circuito.

3.2.6. Pulsador.

Dado que ningún sensor se ajustó a las necesidades del proyecto se tuvo que pensar en cómo censar el movimiento del musculo braquiorradial. Finalmente se pensó en hacer un programa que contara los pulsos cada vez que se presionara un pulsador con el músculo del antebrazo.

Para adaptar el pulsador se diseñó una caja pulsadora cuyas medidas se reseñarán en la sección de aportes. El corte de ésta se realizó con una cortadora láser en mdf de 3mm. En la imagen siguiente se observan las piezas que conforman la caja, así como su estructura final.

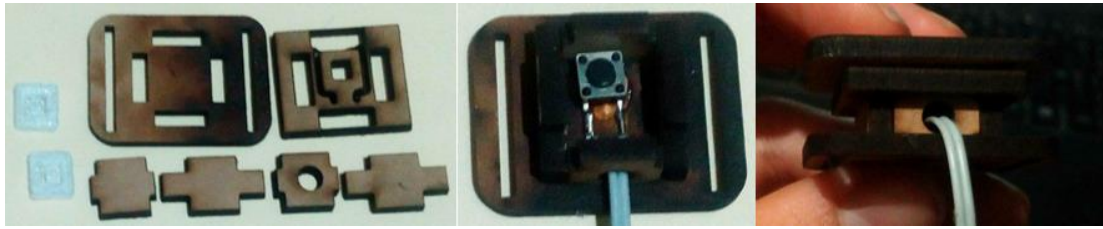


Imagen 85. Caja Pulsadora.

Para que se pudiera ajustar al ante brazo se diseñó un brazalete en donde se sujetó la caja pulsadora como se observa en la siguiente imagen.



Imagen 86. Caja adaptada al musculo braquiorradial.

3.2.6.1. Circuito para código contador de pulsos.

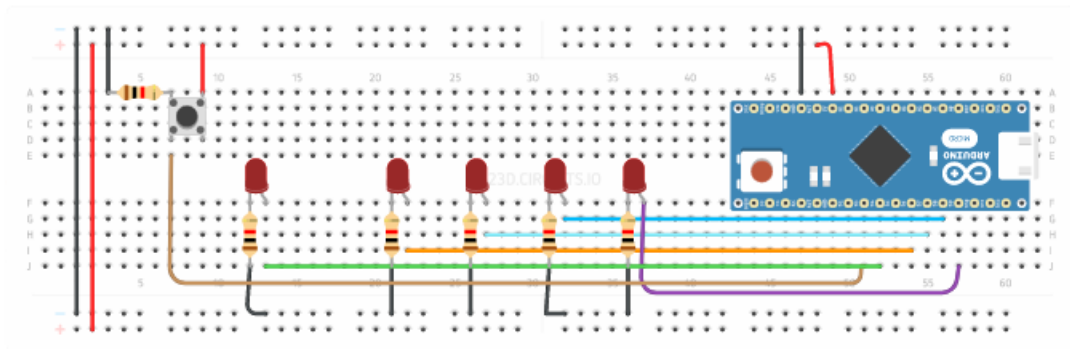


Imagen 87. Circuito implementado para el código contador de pulsos.

Para este proyecto se optó por la resistencia Pull-Down que es la que mejor se adapta para contar los pulsos.

Al realizar la primera prueba con el pulsador se observó que este mandaba mal las lecturas. Cuando se presionaba una vez mandaba 2 o 3 pulsos, por lo que se tuvo que ajustar el rebote o ruido que generaba el pulsador al ser accionado.

La forma en que se le dio solución al problema de los rebotes para este proyecto fue por medio de software, quedando de la siguiente manera.

3.2.6.2. Código que ajusta el rebote.

- 1- Todo el código referente al pulsador se encuentra en un while que siempre es verdad.

```
while(true){
```

- 2- Se lee el estado del pulsador, en este caso del pin digital 2 de Arduino.

```
botomStatus = digitalRead(2);
```

- 3- Si el estado del botón es presionado y el estado anterior era no presionado, en la variable status se almacenan las pulsaciones si la condición anterior se cumple y se empieza el conteo en milisegundos.

```
if (botomStatus == HIGH && botomAnterior == LOW) {  
    status = status + 1;//verifica si el usuario a presionado el botom  
    Serial.println("status:"); Serial.println(status);  
    inicio_pulso = millis(); //esta funcion cuenta el tiempo pasado  
    delay(25);  
}
```

- 4- Si estatus es diferente de cero, se realiza un retardo de 25 milisegundos y concurrencia se incrementa de uno en uno.

```
if(status != 0){  
    delay(25);  
    concurrencia++;  
}
```

- 5- En la variable x se guarda el residuo de concurrencia dividido en 2.

```
x=concurrencia%2;
```

- 6- Si se cumple la condición de status diferente de cero y x es igual a cero y concurrencia vale ochenta, hace una comparación binaria, la cual siempre va a ser verdad y se rompe el ciclo while (true) con el break.

```
if(status != 0 && x==0 && concurrencia==80){  
    compareTo=true;  
    break;  
}
```

- 7- Se asigna en botón anterior el estado del botón para saber si se has presionado el pulsador y cierra el ciclo While(true).


```

    botomAnterior = botomStatus;

}

```

El rebote del pulsador se solucionó perfectamente sin necesidad de componente electrónico y no tiene fallas al contar pulsaciones.

3.2.6.3. Funcionamiento del programa contador de pulsos con la mano.

Para probar el contador de pulsos se utilizó el circuito de la imagen 87. La idea inicial era que la mano tuviera 6 movimientos, cada uno de ellos representado por un led. Se recibían los pulsos en un intervalo de tres segundos. Éstos eran recibidos en una sentencia Swich-case y se dirigía al caso correspondiente. Por ejemplo, si se presionaba el pulsador una vez a los 3 segundos se podía ver que el led 1 encendía. Si se presionaba dos veces a los tres segundos encendía el led 2 y así podía ir sucesivamente hasta recibir seis pulsaciones.

➤ Programa que controla la mano (versión 1).

Después de ajustar el rebote.

- 1- Se valora que la variable status sea diferente de cero con la condición, si compareTo es igual a true.

```

if(compareTo == true){

```

- 2- Según los pulsos almacenados en la variable status es el led que se encenderá.

```

switch (status)
{
    case 1: Serial.println("Clase1");
            digitalWrite(led1,HIGH);
            status = 0;
            compareTo=false;
            concurrencia = 0;
            entero=0;statusP=0;
            break;

    case 2: Serial.println("Clase2");
            digitalWrite(led2,HIGH);
            status = 0;
            compareTo=false;
            concurrencia = 0;
            entero=0;statusP=0;
            break;

    case 3:Serial.println("Clase3");
            digitalWrite(led3,HIGH);
            status = 0;
            compareTo=false;
            concurrencia = 0;
            entero=0;statusP=0;
            break;
}

```

Al ver que el programa funcionaba correctamente se remplazaron los pulsadores por 5 servos motores, que son los motores más comúnmente usados por novatos que empiezan a desarrollar prótesis.

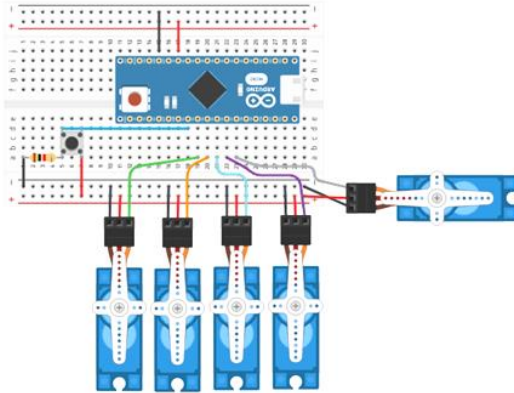


Imagen 88. Circuito contador de pulsos con servos.

El programa recibía los pulsos y los procesaba en una sentencia Switch-case con la que se seleccionaba el caso correspondiente para accionar algún motor que se movería de 0 grados a 180 y esto accionaba el cierre total de un dedo.

3.2.7. Conclusión a la sección.

De todos los sensores, el pulsador fue el que mejor procesó los movimientos del musculo braquiorradial, y también fue el más simple y económico, lo que ayudó mucho a cumplir uno de los objetivos, a saber: hacer una prótesis económica.

También se observó que se pueden ajustar o estabilizar los sensores de dos formas que es por hardware y por software; siendo este último método el más económico, en algunos casos el mejor.

Una vez que se ha desarrollado el programa medular del proyecto, se prosigue a buscar un diseño de mano en 3D o modelar desde cero una, para saber qué motores son lo que se utilizarán.

3.3. Diseño de la Prótesis de Mano en 3d.

Esta sección comprende la introducción, las modificaciones realizadas en el modelo Flexy Hand y las conclusiones a las que se llegaron.

3.3.1. Introducción a la sección.

El diseño de la prótesis fue una de las partes más importantes de este proyecto, ya que es la que conserva la estética. Para esto fueron consultados varios diseños de prótesis en 3D para seleccionar uno y después con un software de diseño se modificó, tomando lo que se consideró lo mejor de cada prótesis para crear la de este proyecto.

En internet existen muchos bancos de imágenes 3D, donde se pueden encontrar diferentes diseños de varias cosas. La mayoría de las personas suben sus diseños con las extensiones STL⁸ u OBJ⁹.

De todos los diseños de manos consultadas, se valoró qué era lo mejor, si modelar una mano propia o tomar algún modelo anteriormente mencionado y ajustarlo a las necesidades del proyecto. Se optó por tomar el modelo Flexy-Hand – Fila Flex Remix, que es estético y con las modificaciones necesarias se ajustaría al proyecto.

3.3.2. Modificaciones realizadas al modelo Flexy-Hand – Fila Flex Remix.

Como los archivos de esta mano se podía descargar con extensión STL y se necesitaba hacer modificaciones, se procesó el archivo en SolidWorks.¹⁰

Al importar el archivo en SolidWorks la conversión de STL a gráfico tardó demasiado y cada operación que se realizaba consumía muchos recursos de la computadora y a veces llegaba a trabarse la máquina. Para evitar esto se buscó una plataforma online de diseño en 3D. Hay varias plataformas, pero se selecciona Tinkercad¹¹ que es un software gratuito y fácil de utilizar. La ventaja de este es que permite procesar

⁸ Los archivos STL (Standard Triangle Language) es un formato de archivo informático de diseño asistido por computadora (CAD) que define la geometría de objetos 3D, excluye información de color y textura.

Fue creado por la empresa 3D Systems y especialmente utilizado por el software de impresoras 3D de extrusión de plástico. [59]

⁹ Los archivos de extensión OBJ son conocidos como Wavefront 3D Object File, fueron desarrollados por Wavefront Technologies. Es un formato de archivo usado para un objeto tridimensional que contiene las coordenadas 3D (líneas poligonales y puntos). Estos archivos se pueden exportar y abrir por varios programas de edición de imágenes en 3D. [58]

¹⁰ SolidWorks es un programa de diseño mecánico en 3D usando sólidos paramétricos, se enfoca a diseño de productos, diseño mecánico, ensamblajes, también permite realizar simulaciones de movimiento.

¹¹ <https://www.tinkercad.com/>

archivos STL y aplicar operaciones directamente, sin ocupar muchos recursos computacionales. La desventaja es que no es tan preciso como SolidWorks.

Al procesar el diseño seleccionado de la mano, se aplicó transparencia a la palma y se observó que esta era totalmente sólida, por lo que había que ahuecarla para poder meter los motores.

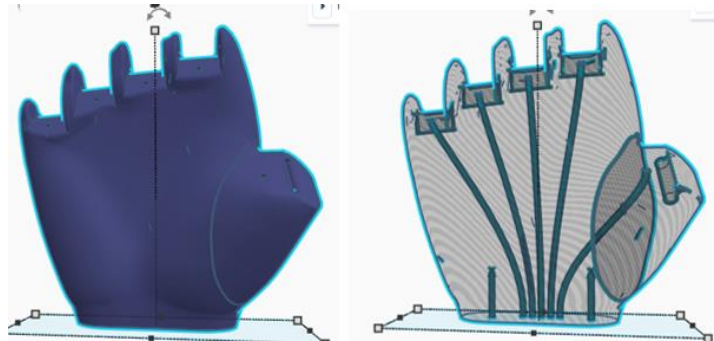


Imagen 89. Palma procesada y con transparencia.

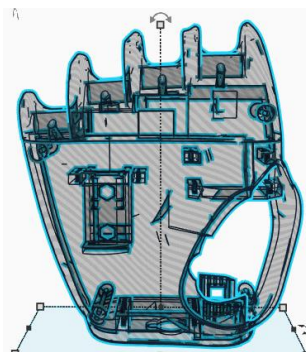


Imagen 90. Primeras modificaciones de la palma de mano.

Como se comentó anteriormente el dedo pulgar de esta prótesis es estático por lo que se realizó un corte y se adaptó para que el dedo pulgar tuviera movilidad con un servo de 0 a 90 grados.

Este dedo no fue funcional porque diseñado de esta manera no se tenía un ajuste preciso con el servo pues tendía a moverse mucho y hacía falta un eje entre el motor y el dedo para que quedara justo y tuviera un buen agarre.

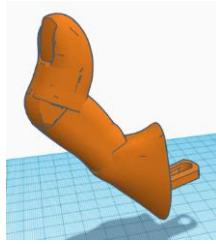


Imagen 91. Dedo pulgar adaptado para servo.

A los otros cuatro dedos no se les tuvo que hacer ninguna modificación, así que se imprimió el dedo índice para hacer pruebas.

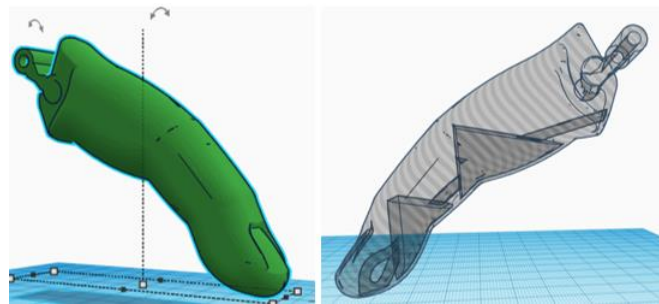


Imagen 92. Dedo procesado y dedo con transparencia.

Se imprimió un dedo de prueba en filamento flexible y el resultado de la primera prueba fue la flexibilidad del mismo. Sin embargo, cuando se dobló por primera vez el dedo se desgarró en donde se supone que deben estar las bisagras flexibles, pero aun así siguió funcionando y se veía estético, esto pudo ocurrir por el material que era filamento flexible genérico y la recomendación era imprimir con filamento flexible de la marca FilaFlex o que el porcentaje de relleno (40%) no era el adecuado y el dedo quedó muy rígido.



Imagen 93. Dedo impreso y primera prueba de flexibilidad.

A lo que se llegó fue que este dedo no serviría para el proyecto si se imprimía con un filamento flexible genérico, por lo que se tomaron los dedos del diseño Flexy Hand.

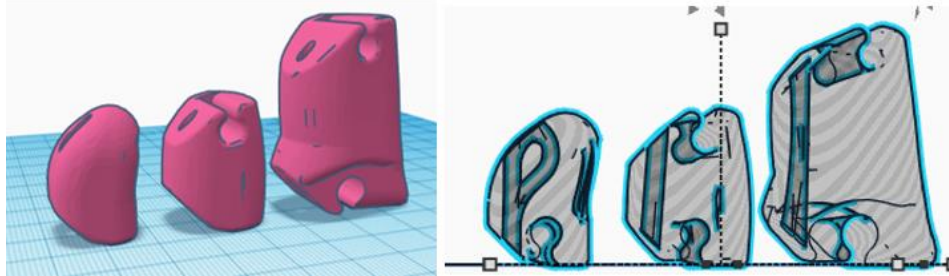


Imagen 94. Dedo índice procesado y dedo con transparencia.

Posteriormente, se imprimió el dedo índice en PLA para realizar pruebas.



Imagen 95. Dedo índice impreso.

El dedo se imprimió en 3 partes y en material flexible las bisagras o falanges.

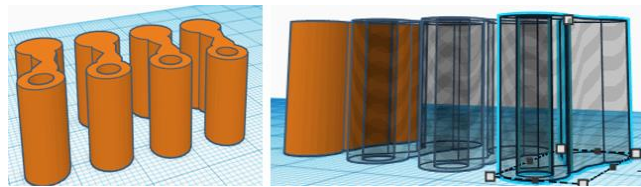


Imagen 96. Bisagras procesadas y con transparencia.



Imagen 97. Dedo resultante.

Este dedo resultó funcional, resistente y viable para el proyecto. Así que el diseño que se seleccionó fue Flexy Hand.

3.3.3. Conclusiones a la sección.

Es difícil crear un modelo de prótesis de mano y también hacer las modificaciones necesarias porque con el software de diseño parece que todo va a servir a la perfección, lo que no se cuenta al momento de diseñar son las variables externas como la fricción y la gravedad, que sólo imprimiendo se pueden ver este tipo de fallas y aun así imprimiendo con el filamento flexible se tiene que tomar en consideración el porcentaje que se imprime para que las piezas no queden tan rígidas y/o pesadas y lleguen a quebrarse como fue el caso del dedo índice.

Al tener contemplado el modelo de mano, se pudo tener noción de las medidas en el interior de la palma para seleccionar los motores, la mecánica y mecanismo.

3.4. Actuadores, Mecanismos y Encoders.

Esta sección comprende la introducción, las pruebas con los motores seleccionados, la adaptación de una tarjeta de control de servo como encoder al Motorreductor seleccionado y las conclusiones a las que se llegaron.

3.4.1. Introducción a la sección.

En este segmento se muestran las pruebas realizadas a micro motor reductores y servos, viendo los pros y contras de cada uno, con base en los resultados obtenidos se seleccionó el actuador; fue necesario contar revoluciones para diseñar un mecanismo de engranaje para transmitir potencia mecánica y se dio solución a cómo detectar la posición de un motor utilizando un sensor absoluto (véase capítulo 2).

3.4.2. Actuadores seleccionados.

Los motores eléctricos que se seleccionaron para este proyecto fueron los servomotores y micro moto reductores que se describen a continuación.

➤ **Servomotor Micro SG90 9G**

Características:

Es un motor pequeño con 22.8mm de largo, 12.2mm de ancho y 27mm de altura, pesa 9 gramos por sus engranes de plástico. Tiene un motor de corriente directa con el que mueve el sistema de engranajes. Tiene un torque de 1.2 a 1.8Kg por centímetro. Un voltaje de operación de 4.8 a 6V. La corriente de trabajo es menos de 500mA. El ángulo de giro de 180 grados y la velocidad con la que gira es de 4.8 volts en 0.1segundo.



Imagen 98. Servomotor Micro SG90. Tomada de [41]

➤ **Micro moto reductor Pololu.**

Características:

Son motores de corriente directa con escobillas de carbón. Tienen varias relaciones de engranajes, de 5:1 hasta 1000:1. Dependiendo de la relación¹² es el torque que se maneja. Su voltaje es de 6 volts. La corriente máxima de trabajo 1.6A. Mide 29.5mm de alto, 12mm de largo y 10mm de ancho.



Imagen 99. Micro moto reductor Pololu. Tomada de [42]

¹² Las relaciones que utiliza son la velocidad del giro del motor. Por ejemplo, la relación 5:1 quiere decir que por cada 5 vueltas que da el motor, el eje que sale de la caja reductora sólo da una vuelta. Cómo puede observar las cajas reductoras disminuyen el giro de velocidad e incrementa el torque.

3.4.3. Pruebas con los motores y mecanismos.

Para realizar las pruebas se necesitó que el servomotor girara continuamente y no sólo 180 grados, por lo que se retiró el potenciómetro que tenía.

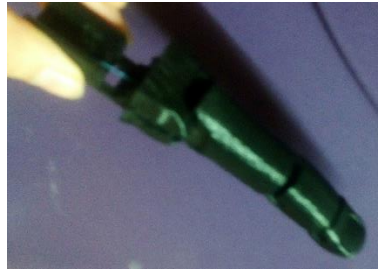

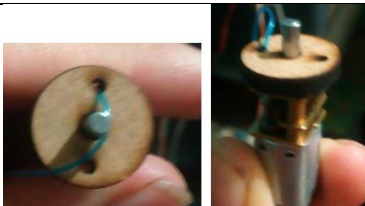


Imagen 100. Dedo índice para pruebas.

➤ Mecanismo Twisted String.

Twisted String y Servo.	
Resultados. El primer mecanismo que se utilizó fue el Twisted String y servo, tardó en dar un cierre total del dedo en 15 segundos, la ventaja fue que el dedo tenía mucha fuerza al momento de cerrar. Por el tiempo que tardó, el motor servo fue descartado para este proyecto.	Imagen.  Imagen 101. Cierre de dedo con motor servo.
Twisted String y motores Pololu.	
Para realizar las pruebas con los motores Pololu fue necesario cortar en laser una rueda donde encajar el eje D del motor y con dos orificios en cada lado para poder amarrar el hilo del mecanismo del Twisted String.	 Imagen 102. Adaptación a los motores Pololu.

Motor Pololu relación 30:1.	
<p>Resultados.</p> <p>El Motor Pololu utilizado fue de relación 30:1 de 1000 RPM (revoluciones por minuto), con un torque 600g-cm y mecanismo Twisted String. Tardó en dar el cierre total en 9 segundos, con una fuerza considerable. Sin embargo, por el tiempo que tardó en cerrar se descartó para el proyecto.</p>	<p>Imagen.</p>  <p><i>Imagen 103. Prueba de cierre de dedo con motor Pololu 30:1.</i></p>
Motor Pololu 5:1.	
<p>Resultados.</p> <p>Con la prueba anterior, se probó que se necesitaba velocidad y se optó por un motor Pololu con relación 5:1 de 6000 RPM, con un torque de 100g-cm, el resultado fue que el motor fue bastante rápido, pero no tuvo la fuerza suficiente para hacer un cierre completo, sólo logro cerrar la mitad del dedo.</p>	<p>Imagen.</p>  <p><i>Imagen 104. Prueba de cierre de dedo con motor Pololu 5:1.</i></p>
Motor Pololu relación 10:1.	
<p>Resultados.</p> <p>Las pruebas de los dos motores anteriores mostraron que el de 1000 rpm era muy lento y el de 6000 rpm era muy débil. Se seleccionó un motor intermedio de la marca Pololu con relación 10:1 de 3000 RPM, con un</p>	<p>Imagen.</p>  <p><i>Imagen 105. Prueba de cierre de dedo con motor Pololu 10:1.</i></p>

<p>torque de 300g-cm. El resultado fue que el motor tardo 2 segundos en intentar un cierre, pero como su antecesor no pudo hacer el cierre completo del dedo, por lo que el motor fue descartado para este proyecto.</p>	
<p>Conclusiones del mecanismo Twisted String.</p> <p>Con base en las pruebas, el motor adecuado para este mecanismo debería tener 2000 rpm con un torque de 500g o 600g. Dado que no se pudo conseguir, el mecanismo Twister String tuvo que ser descartado del proyecto.</p>	

Tabla 3 Pruebas con el mecanismo Twisted String.

➤ **Pruebas con el mecanismo impulsado por tendón.**

Para realizar las pruebas relacionadas con el cierre completo de los dedos con el mecanismo impulsado por tendón, se adaptó a los motores Pololu un carrete hecho con una cortadora laser como se muestra en la siguiente figura.



Imagen 106. Motor Pololu con carrete.

➤ **Forma en la que funciona el mecanismo impulsado por tendón.**

Cuando el tendón rueda por el carrete del actuador, el dedo se flexiona, cuando se desenrolla las falanges elásticas de filamento flexible extienden el dedo.


Mecanismo impulsado por tendón y motor Pololu relación 30:1.	
Resultados. Como la relación de transmisión define el torque que tiene el actuador, se pensó en utilizar el motor que tuviera el torque más alto que fue el de 600g-cm. El resultado fue que era rápido pues el carrete le ayudaba, pero no tuvo la suficiente fuerza para hacer el cierre del dedo; se forzaba mucho el motor, por lo tanto, se descartó del proyecto.	
Mecanismo impulsado por tendón y Servomotor.	
Resultados. Igual que el motor anterior el servo no pudo hacer un cierre completo, por lo que se tuvo que buscar un motor que tuviera un torque elevado y que fuera de tamaño pequeño. Se encontró un micro motor reductor Pololu con relación 1000:1 de 32 RPM, con un torque 9kg-cm, es uno de los más fuertes de la familia de micro motor reductores Pololu y también uno de los más costosos.	
Mecanismo impulsado por tendón y motor Pololu relación 1000:1.	
Resultado. El resultado de esta prueba fue que el dedo alcanzó a dar un cierre completo, y la velocidad fue un poco lenta pero aceptable, por lo tanto, el motor seleccionado para este proyecto fue el de relación 1000 a 1.	Imagen.  <i>Imagen 107. Prueba de cierre de dedo con motor Pololu 1000:1.</i>

Tabla 4. Pruebas con el mecanismo Impulsado por tendón.

Como había que comprar 4 motores para la mano y cada motor Pololu 1000:1 tiene un costo entre \$480 y \$500 pesos mexicanos, se tuvo que investigar si había motores genéricos con las mismas características que el Pololu, y sí lo hubo, pero existían 3 tipos de motor uno con 10 RPM y un torque de 5 kg-cm; otro de 15 RPM y un torque de 7 kg-cm y finalmente 20 RPM y un toque de 8 Kg-cm, su costo de cada motor ronda en los \$85 pesos mexicanos. La siguiente tabla muestra un comparativo entre ambos motores.



Diferencias	Motor Pololu 1000:1	Motor genérico 1000:1
RPM	32	20
Torque	9Kg-cm	8kg-cm
Precio	\$480-500 pesos.	\$85pesos.
Amperaje	1.6	1.6
Medidas	29.5mm*12mm*10mm	29.5mm*12mm*10mm
Apariencia		

Tabla 5. Comparación entre motor Pololu y motor genérico 1000:1.

Como se puede observar, entre estos dos motores la gran diferencia radica en las revoluciones por minuto. Para minimizar los efectos, se hizo el centro del carrete más ancho, ya que entre más ancho el carrete, más hilo jalaría en cada vuelta y otra de las grandes diferencias es el precio, lo que ayuda con el objetivo de hacer una prótesis económica.

3.4.4. Pruebas con encoders.

Como la mano funciona con 4 micro motor reductores lo ideal es que cada uno tuviese su propio encoder y, por lo tanto, su propia interrupción. El Arduino que se estaba implementado para pruebas era un nano que tiene sólo dos interrupciones de 4 que se requerían, por lo que se tenía la opción de cambiar de Arduino o buscar una mejor opción de encoder.

Se optó utilizar como encoder la tarjeta electrónica y potenciómetro que integran los servomotores Micro SG90 9G.



Imagen 108. Tarjeta electrónica y potenciómetro de Micro SG90 9G.

El potenciómetro y la tarjeta electrónica permiten controlar la posición del eje, la relación de engranajes está diseñado para moverse 180 grados y puede mantenerse fijo en la posición que se le especifique.

Entendiendo como funciona el control de posición del servo, se pensó en diseñar una relación de engranajes entre el eje del motor Pololu y el eje del potenciómetro, pero primero se debía conocer con cuántas revoluciones cerraban completamente un dedo, para saberlo se realizó la prueba que se describe a continuación.

➤ **Materiales:**

1 Led emisor infrarrojo y 1 Led receptor infrarrojo.

1 Arduino nano.

1 Motor Pololu 1000:1.

1 Potenciómetro y la tarjeta electrónica de servo Micro SG90 9G.

En el circuito sólo se conectaron los dos leds infrarrojos. El receptor se conectó al pin 2,

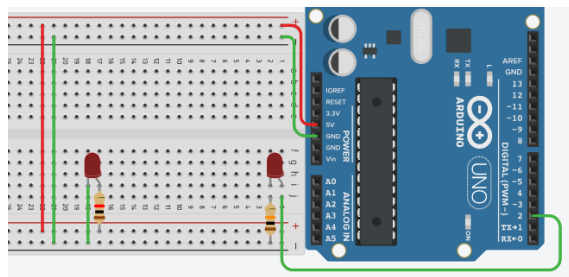


Imagen 109. Circuito con leds infrarrojos.

➤ **Funcionamiento.**

Cada vez que el motor girara y un aspa se interpusiera entre el emisor y el receptor, este incrementaría uno en un contador, así se conocerían las vueltas que deben darse para que un dedo cerrara completamente, su función es como el de un encoder óptico.



Imagen 110. Circuito implementado para conocer las vueltas del motor.

Las lecturas del Arduino oscilaban entre 2,3 y 4 vueltas para un cierre completo del dedo. Se tomaron 3 ¼ para calcular la relación de tren de engranaje simple entre el eje del motor y el potenciómetro, para ver la nomenclatura de un engrane ver Apéndice 1.

3.4.4.1. Relación de engranaje.

Se pueden obtener la relación de engranajes entre el número de dientes, revoluciones o diámetro de paso. Las formulas se pueden expresar en pulgadas o milímetros.

Formulas.

Pulgadas.

$$DP = N/PD$$

Milímetros.

$$MDL = PD/N$$

Donde.

DP = Paso Diametral.

PD = Diametro de Paso.

N = Numero de Dientes

Relación de engranajes formula.

$$R = \frac{N \text{ corona}}{N \text{ piñon}}$$

Formulas tomadas de [54].

Para obtener, en pulgadas, la relación de engranaje entre el número de diente se debe de asignar el número de dientes para la corona y el número de dientes para el piñón. Considérese el siguiente ejemplo:

Datos.

$$N \text{ corona} = 34$$

$$N \text{ piñon} = 10$$

Sustituyendo en la fórmula de relación de engranajes.

$$R = \frac{34}{10}$$

$$R = 3.4: 1$$

Lo que quiere decir que por cada 3.4 vueltas que, de el piñón, la corona habrá dado una vuelta.

Con esta fórmula se encontró la relación que se necesitaba para que un dedo haga el cierre completo.

Para diseñar la corona y el piñón, falta saber el diámetro de paso de cada uno.

Datos de la corona:

$$PD=?, N=30, DP=16.$$

$$PD_{corona} = \frac{34}{16} = 2.125''\phi$$

Datos de Piñón:

$$PD=?, N=10, DP=16.$$

$$PD_{piñon} = \frac{10}{16} = 0.625''\phi$$

Calculando distancias entre centros.

$$D_{centros} = \frac{PD_{corona} + PD_{piñon}}{2}$$

$$D_{centros} = \frac{2.125''\phi + .625''\phi}{2}$$

$$D_{centros} = 1.375''$$

Con los datos anteriores, se pudo utilizar el toolbox, relación de potencia de Solidworks para diseñar engranes.

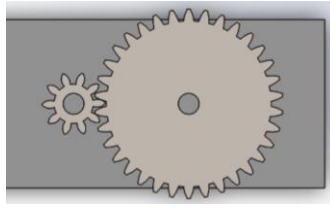


Imagen 111. Piñón y corona para el cierre de dedo.

Para el giro de muñeca la relación de engranajes quedo de la siguiente manera.:

Datos.

$$N \text{ corona} = 23$$

$$N \text{ piñon} = 17$$

Sustituyendo en la fórmula de relación de engranajes.

$$R = \frac{23}{17}$$

$$R = 1.4:1$$

Lo que quiere decir que por cada 1.4 vueltas del piñón, la corona habrá dado una vuelta. Con las siguientes expresiones, se calcula la distancia entre centros del piñon y la corona.

$$PD_{\text{corona}} = \frac{23}{16} = 1.43''\phi$$

$$PD_{\text{piñon}} = \frac{17}{16} = 1.06''\phi$$

$$D_{\text{centros}} = \frac{1.43''\phi + 1.06''\phi}{2}$$

$$D_{\text{centros}} = 1.245''$$

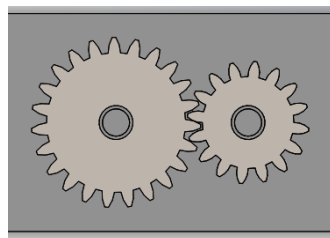


Imagen 112. Relación de engranajes para la muñeca.

Hecho lo anterior, se diseñó un holder¹³ para probar la relación de engranaje de la muñeca y el cierre de dedo.

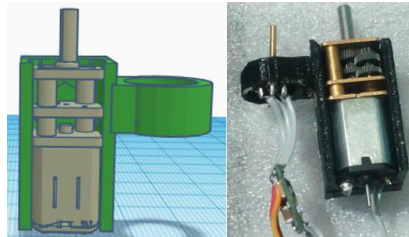


Imagen 113. Holder con manorreductor, potenciómetro y tarjeta electrónica.

Con base en las pruebas realizadas, los controles de giro con las relaciones de engranaje funcionaron adecuadamente.



Imagen 114.. Engranajes del giro de muñeca.

Es importante señalar que el rango de lectura del potenciómetro es sólo media vuelta (180°), lo que quiere decir que no daría las tres vueltas completas, por lo tanto, no se realizaría el cierre de dedo completo y si se ajustaba la relación de engranaje, la corona quedaría muy grande y no cabría en el interior de la mano.

Para solucionar lo del cierre de dedo se optó por hacer una relación uno a uno, quitando dientes al engrane del eje del motor, quedando de la siguiente manera.

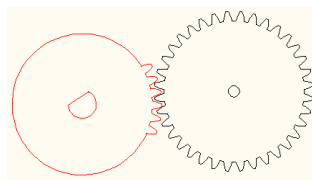


Imagen 115. Relación de engranaje uno a uno.

¹³ Véase el glosario para mayor referencia.

Quedando en el engrane del eje del motor 6 dientes y en el engrane del eje del potenciómetro 36 engranes, lo que quiere decir que por 3 vueltas del engrane de 6 dientes, el otro engrane dará media vuelta o 180° .

La desventaja de usar la relación de engranaje uno a uno es que no se tiene la misma exactitud al posicionar el motor que con la relación 1.4:1. Con la relación uno tardo en ajustarse en la posición o grado deseado como consecuencia hace un pequeño zumbido.

3.4.5. Conclusión a la sección.

Todos los mecanismos probados fueron funcionales. El mejor es el mecanismo twisted string, como conjetura si se incluyera una polea a su mecanismo sería el cierre del dedo más rápido o si existiera un motor reductor con 2000 o 3000 rpm con un torque mínimo de 600kg-cm. Con los motor reductores seleccionados (1000:1), probablemente la mejor opción sería un encoder magnético que sea más preciso. La única desventaja es la placa que cuenta con sólo 2 interrupciones, pero se podría usar un Arduino Leonardo que cuenta con 4 interrupciones.

Finalmente, se seleccionó el encoder más económico que es el potenciómetro, pero se tendría más exactitud en el movimiento, si se tuviera más espacio en la mano o se tuviera las herramientas para hacer engranes más pequeños.

3.5. Circuito de la Mano Robótica.

Esta sección comprende a la introducción, diseño de circuito, la forma de alimentar a esté y las conclusiones.

3.5.1. Introducción a la sección.

En este capítulo se muestra la conexión de los componentes electrónicos y la razón por la que estén en el circuito, también el cómo se resolvió el problema para evitar que los motores de la mano se quemaran a causa de forzar los motores, al mismo tiempo se resolvió el cómo saber si la mano ha tomado un objeto.

3.5.2. Materiales.

- 1 Arduino pro mini.
- 1 módulo TTL para programar el Arduino pro mini.
- 2 resistencias de 10 k Ω .
- 3 resistencias de 220 Ω .
- 1 led RGB de ánodo común.
- 2 pulsadores.
- 1 placa de baquelita.
- 4 micro motor reductores relación 1000:1.
- 4 placas de circuito de control de servomotor Micro SG90 9G.
- 1 tira de pines macho.
- 1 metro de soldadura de estaño.
- 1 botella de cloruro de hierro.

3.5.3. Componentes.

➤ Led RGB ánodo común.

Este led se colocó para poder saber en qué caso o movimiento se encontraba la mano.

➤ Pulsadores.

Como ya se explicó anteriormente los pulsadores sólo mandan dos estados, alto (on) y bajo (off); se conectaron con la resistencia Pull Down, lo que quiere decir que su resistencia va conectada a negativo.

En el circuito, el primer pulsador es el que cuenta los pulsos y permite el control de la mano, entrando a un caso y cada caso es un movimiento.

El segundo pulsador se agregó porque al realizar las pruebas con los motores se notó que las placas de control de los servos se calentaban si se forzaban, esto sucede cuando el motor es sometido a trabajar con un torque más alto al que fue diseñado o cuando algo bloquea su paso y el servo trata de llegar a una posición indicada.

El segundo pulsador se colocó en la punta del dedo índice (este dedo es el involucrado o el común en todos los movimientos de la mano) para cuando la mano cerrara y el pulsador fuera presionado por el objeto que se agarrara, los motores se quedarían en esa posición, sin forzar más los motores y sin presionar más el objeto y así evitar que se sobrecaliente el motor y la placa servo de control provocando que estos ya no funcionen.

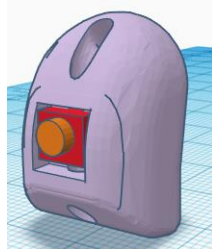


Imagen 116. Diseño de punta de dedo índice y pulsador.

3.5.4. Circuito impreso.

Es una placa de baquelita recubierta completamente con una lámina de cobre, sobre la cual se dibujan ‘pistas’ (trazo o línea) e ‘islas’ (circulo donde un componente será insertado) de cobre las cuales forman el trazado del circuito, partiendo de un diseño. El diseño se realizó en AutoCAD, después se pegó plástico auto adherible del lado del cobre y con la cortadora laser se trazaron las pistas e islas del diseño. Se metió la placa en acido (cloruro de hierro), hasta que solo quedaron las pistas trazadas.

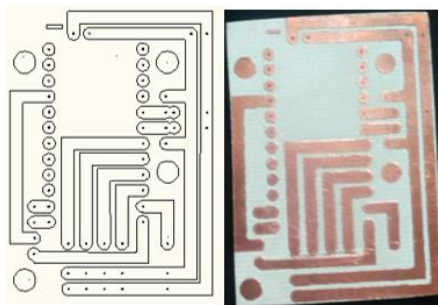


Imagen 117. Pistas e islas trazadas en AutoCAD y circuito en baquelita.

El diseño se trató de hacer lo más compacto posible, sus medidas fueron de 3.5 cm por 4.5 cm.

Se perforó la placa y se ensamblaron los componentes.

3.5.5. Circuito de la mano.

En el circuito de la imagen 118 se pueden ver los pines en los que se conectó cada componente. Éste Arduino uno es muy similar al mini pro. Los servomotores representan a los micro motor reductores 1000:1. Los pulsadores 1 y 2 conectados a los pines 2 y 3, permiten manejar interrupciones. La interrupción del pin 3 es fundamental para que los motores dejen de girar inmediatamente que se detecte que se sujetó un objeto, y el led RGB conectado a los pines PWM 9, 10 y 11 sirve para identificar qué movimiento realiza la mano.

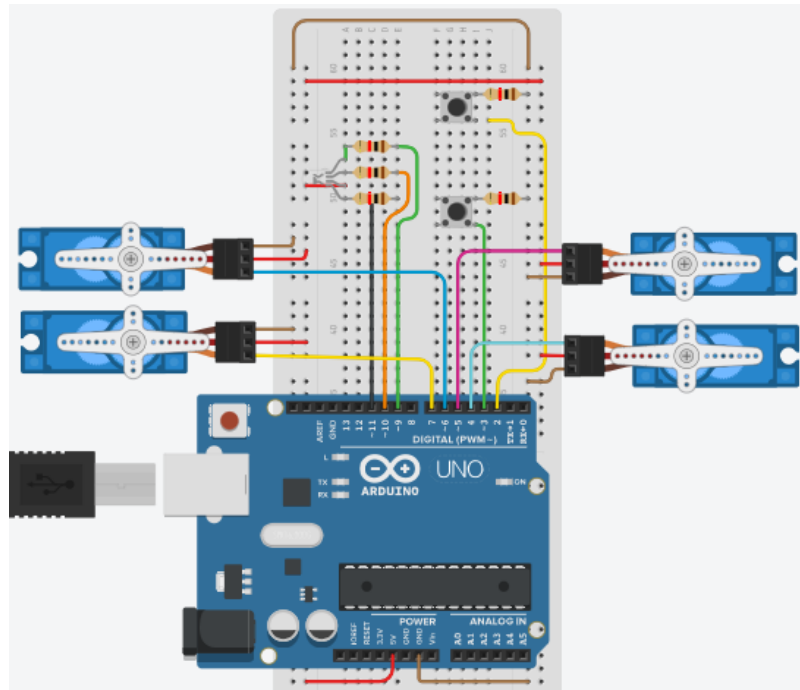


Imagen 118. Circuito de la mano.

3.5.6. Alimentación del circuito.

El voltaje y amperaje de la batería a utilizar dependen del consumo de cada uno de los componentes del circuito.

3.5.6.1. Amperios de cada componente.

- Arduino mini pro consume 15mAh, puede ser alimentado de 5v a 12v, entrega como máximo 500mAh.

- 4 Micro motor reductores de relación 1000:1, cada uno consume 6v y 1.5mAh como máximo.
- El led RGB y los pulsadores se alimentarán del voltaje y los amperes que proporciona Arduino.

Lo que nos da un total de consumo de 6v 7amh como mínimo.

Las baterías que pueden proporcionar ese voltaje y amperaje son las LiPo, que sería la batería ideal para este proyecto.

3.5.7. Conclusión a la sección.

Este tipo de motores Pololu o genéricos consumen mucho amperaje. Con el amperaje que consume uno de estos motores se podría alimentar 3 micro servos. Es un inconveniente que se notó hasta realizar el circuito y calcular el amperaje que consume.

La batería seleccionada (LiPo) es costosa por el amperaje que consume, pero es la mejor opción ya que no ocupa mucho espacio.

Por parte del segundo pulsador agregado se considera una opción viable, ya que muchas prótesis resuelven el problema de no quemar los servos colocando sensores de presión o de tensión en toda la mano, el inconveniente es que estos sensores son costosos.

3.6. Últimas Modificaciones.

Esta sección comprende la introducción, las modificaciones que se tuvieron que hacer al diseño, código y las conclusiones que se llegaron.

3.6.1. Introducción a la sección.

En el transcurso del proyecto se seleccionaron sensores, motores a los cuales se les diseño un holder, se acopló un encoder (potenciómetro), aparte se buscó una forma de implementar el giro de muñeca, todo esto se tuvo que acoplar en el diseño.

En el código se buscó una forma de control (utilizando el mismo pulsador que entra en los diferentes casos o movimientos que hace la mano) para abrir y cerrar la mano

a voluntad y controlado por grados para tener un mejor agarre de objetos lo que también es una protección extra a los motores aparte del pulsador integrado al dedo índice.

3.6.2. Modificaciones al control de la mano.

Las mejoras realizadas fueron:

- Nueve movimientos diferentes divididos en tres grupos, aparte de estos el giro de muñeca y el control de abrir y cerrar por grados.
- El programa contiene 6 case y un default. La forma de entrar a estos grupos es por medio de los pulsos mandados.

Para el case 1 se pulsa una vez, para el case 2 es una pulsación larga, para el case 3 son dos pulsaciones seguidas, para el case 4 es una pulsación seguida de una pulsación larga, para el case 5 son tres pulsaciones seguidas, para case 6 son dos pulsaciones seguidas y una prolongada, para entrar a default son cuatro o más pulsaciones.

case 1: contiene los movimientos del grupo 1 movimiento 1, grupo 2 movimiento 1 y grupo 3 movimiento 1.

case 2: al entrar a este case se cierran los dedos de grupo y movimiento que se hallan seleccionado.

case 3: contiene los movimientos del grupo 1 movimiento 2, grupo 2 movimiento 2 y grupo 3 movimiento 2.

case 4: al entrar a este case se abren los dedos de grupo y movimiento que se hallan seleccionado.

case 5: contiene los movimientos del grupo 1 movimiento 3, grupo 2 movimiento 3 y grupo 3 movimiento 3.

case 6: Cuando se entra en este case es para salirse de grupo que selecciono y cambiar a otro.

default: Es el movimiento de muñeca.

3.6.3. Modificaciones al diseño de la mano.

La mano.

Una de las primeras modificaciones que se realizó fue la del dedo pulgar, basándose en la 'prótesis impresa en 3D' de la empresa OpenBionics. Se tomó la idea y se adaptó a este proyecto ya que a diferencia de otras prótesis el dedo pulgar de la prótesis de OpenBionics realiza los movimientos de rotación axial y la articulación interfalángica del dedo pulgar con un motor en vez de 2 motores.

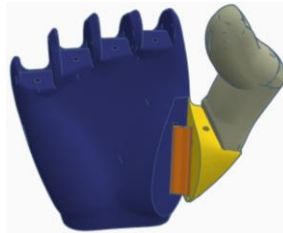


Imagen 119. Modificación del dedo pulgar.

A la mano fue necesario incluirle los cuatro holders para cada motor con relación 1000:1 también se realizaron las perforación para que se pudiera unir la parte frontal y la trasera de la palma con tornillos Allen M3 x 40mm. También se incluyó el giro de muñeca y el espacio en la parte posterior de la palma para el circuito, 3 agujeros más para incluir el led RGB para saber en qué grupo y movimiento se entra la mano, para ingresar los cables tanto de la batería como del sensor que estará en el antebrazo.

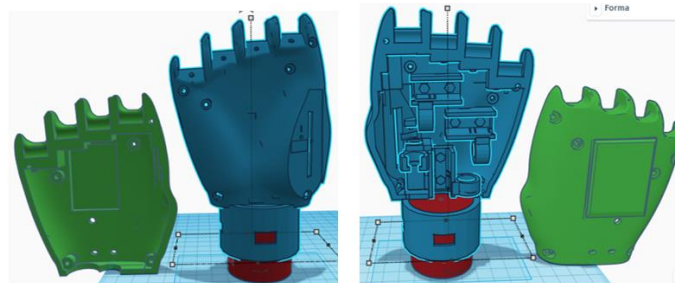


Imagen 120. Diseño final de mano.

3.6.4. Conclusión a la sección.

El control de la mano fue probado con unos micro servos y funcionó el control de grados que es de 0 a 180. Las modificaciones realizadas con la mano se probarán cuando se imprima, arme y se realicen las pruebas.

3.7. Impresión y Armado.

Esta sección comprende en la introducción, impresión armado y conclusiones.

3.7.1.Introducción a la sección.

En este capítulo se muestra los datos de impresión, materiales y herramientas necesarias para el ensamblado de la mano y los pasos para obtener el producto final.

3.7.2.Impresión.

Para la impresión se modificaron los datos de los archivos STL en Cura.

- Mano.

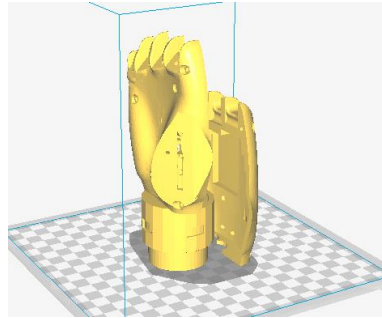


Imagen 121. Palma de la mano.

El relleno de la pieza fue de un 40 por ciento, se imprimió en PLA así que se especificó que el extrusor debía de estar a 206 grados centígrados, como marca el fabricante y 50 grados para el plato de construcción, la impresión marco un tiempo de 10 horas, gastando 32.10 metros de filamento PLA y pesando 95 gramos, según los datos mandados de Cura.

- Dedos.

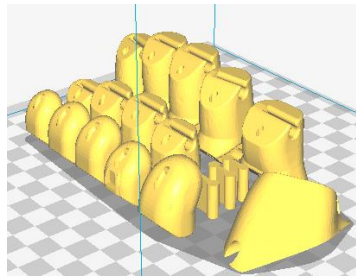


Imagen 122. Dedos modificados para impresión.

El relleno de los dedos fue de un 40 por ciento, se imprimió en PLA se especificó que el extrusor debía de estar a 206 grados centígrados, y 50 grados para el plato de construcción, la impresión marco un tiempo de 5 horas, gastando 12 metros de filamento PLA y pesando 30 gramos, según los datos mandados de Cura.

- Falanges.

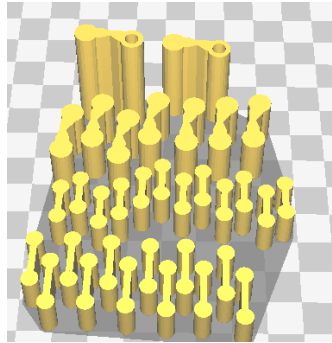


Imagen 123. Falanges preparadas para impresión 3D.

El relleno de las falanges fue de un 20 por ciento. Se imprimió en filamento flexible se especificó que el extrusor debía de estar a 232 grados centígrados, y 50 grados para el plato de construcción, la impresión marco un tiempo de 2 horas, gastando 5 metros de filamento flexible y pesando 13 gramos, según los datos mandados de Cura.

Después de configurar y generar el ‘gcode’ de los 3 archivos, se procesaron cada uno de estos archivos en Repetier host, para llevar un control de la impresión.



Imagen 124. Piezas impresas.

3.7.3. Armado de la mano.

Las herramientas necesarias para el armado de la mano.

- **Materiales.**

- ✓ 2 tornillos Allen M3 por 40 cm y tuercas.
- ✓ 4 tornillos Allen M3 por 30 cm y tuercas.
- ✓ Mano, dedos y falanges impresos.
- ✓ 4 motores relación 1000:1.
- ✓ 4 tarjetas de control de servo Micro SG90 9G con su respectivo potenciómetro.
- ✓ Un par de engranes para el giro de la muñeca relación 1.4:1
- ✓ 3 pares de engranes relación 1:1 con sus respectivas modificaciones, para movimientos de los dedos.
- ✓ Circuito de la mano.
- ✓ Hilo de caña de pescar.
- ✓ Llave Allen 1.5.
- ✓ Soldadura de estaño.
- ✓ Cautín.

- **Ensamblado.**

- 1) Unir los dedos con las falanges flexibles.
- 2) Desarmar 4 servomotores, desoldar sus tarjetas de control y extraerlas junto con el potenciómetro.
- 3) Soldar las tarjetas de control de los servos a los micromotorreductores 1000:1.
- 4) Ensamblar los micromotorreductores con sus respectivos potenciómetros a los holders de la palma de la mano.
- 5) Calibrar los micromotorreductores y colocar los engranes de relación 1:1 al potenciómetro y al eje D, para los dedos y para la muñeca los engranes con relación 1.4:1.
- 6) Armar los carretes en el eje D del motor Pololu.

- 7) Insertar el hilo de la caña de pescar en los dedos y amarrarlo en los orificios de la tapa superior del carrete, asegurándose que el hilo quede tenso.
- 8) Soldar los cables de la tarjeta de control del servo a las pistas correspondientes en el circuito.
- 9) Colocar el led RGB en la parte trasera de la palma.
- 10) Insertar el circuito en la parte trasera de la palma de la mano.
- 11) Juntar las dos partes de las palmas con los dedos colocados en el lugar correspondiente.
- 12) Insertar los tornillos Allen y con sus correspondientes tuercas.

3.7.4. Conclusión a la sección.

El ensamblado fue complejo. Se pudo observar las modificaciones que se le tenían que hacer a la mano; por ejemplo, los potenciómetros no se ajustaron en el holder, así que se tuvo que raspar con una lija en los contornos para que entraran. Fue complicado colocar el motor que mueve al dedo pulgar. Estas modificaciones se realizarán como trabajos futuros.

4. Resultados.

Esta sección comprende la introducción, los resultados o pruebas finales.

4.1. Introducción a la sección.

En este capítulo se muestran las pruebas finales para ver si la mano cubre los requerimientos básicos y si fue capaz de tomar, sostener y manipular objetos.

4.2. Pruebas de movimiento.

Los movimientos que pudo hacer la mano son los siguientes.

1- Palma abierta.

Es la posición inicial de la mano.



Imagen 125. Palma abierta.

2- Puño.

Esta posición se puede utilizar para sujetar diferentes objetos grandes, redondos u ovalados.



Imagen 126. Puño frontal y lateral.

3- Sujetar un Mouse.

En esta posición se puede observar el movimiento de los dedos meñique y anular, también del dedo pulgar, aquí se demuestra que el uso de un solo motor para mover el dedo pulgar es viable aunque le falta una mejor calibración al motor.



Imagen 127. Mouse.

4- Mecanismo, actuadores, encoders.

En esta imagen se muestran el como quedó la mecánica de la mano.



Imagen 128. Interior de la mano.

4.3. Conclusiones a la sección.

El control de los dedos fue complicado por lo que no se realizó ningún agarre de objetos ya que se tendría que calibrar de nuevo los motores y los potenciómetros, esto no fue posible porque fueron pegados con Kola loka y el espacio en la mano era poco, aparte de que algunos hilos de algunos dedos se tronaron al realizar los movimientos mostrados porque los hilos se atoraron en los carretes.

La mano demostró tener fuerza suficiente, a pesar de que se utilizó un motor para mover dos dedos.

5. Conclusiones.

Una de las ventajas que tiene esta prótesis es que no es invasiva. La forma en que se acciona es fácil de entender, así que la instancia previa de entrenamiento es de aproximadamente cinco minutos para que el usuario pueda controlar la prótesis. No necesita mantener presión constante para mantener sujetado un objeto (como con las prótesis mioeléctricas), basta con posicionarse en el cierre deseado. Hasta el momento no se han presentado inconvenientes al procesar la señal del sensor por ningún factor de ruido o interferencia al estar en contacto con la piel o por variaciones de la posición del sensor respecto al musculo braquiorradial.

La calibración de los motores con los engranes seleccionados con relación 1:1 provocó que los motores y las placas de control de servo se calentaran (lo que quiere decir que se forzaron), aparte la manipulación de los dedos no es óptima, estos problemas se solucionarían aplicando los engranes con relación 6:1, para esto se buscará hacer más espacio en la mano o hacer engranes impresos en 3D.

El hilo de caña de pescar que se seleccionó se reventó en algunos dedos en las pruebas, se tendrá que cambiar el hilo implementado, por hilo de acero.

El giro de muñeca funciona, pero para que se accione se tiene que aceitar la pieza, se tendrá que buscar una forma de hacer el giro de muñeca.

El peso de la mano es de 390g y el precio total de la mano sin contar la batería, el socket, ni el trabajo intelectual fue de mil quinientos cuarenta y cinco pesos mexicanos.

Con base a todos los aciertos y errores mencionados anteriormente, se buscará dar solución a cada uno de los problemas para hacer un mejor prototipo de prótesis de mano.

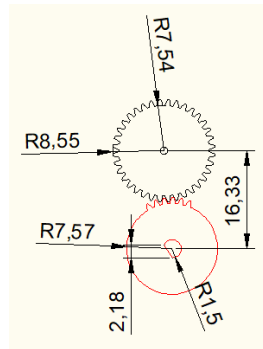
Con la prótesis no se podrá remplazar por completo el miembro superior perdido, pero si será una herramienta útil para que el usuario pueda realizar varias funciones del día a día.

6. Trabajos Futuros.

A continuación, se menciona los cambios o mejoras que se tienen pensados hacer para este proyecto en un futuro.

- Se seguirá mejorando esta prótesis, agregando flexión y extensión en la muñeca, para que sea más fácil manipular objetos.
- Se buscará la forma de implementar el mecanismo Twisted String, para que la mano tenga más fuerza, talvez para esto se implementara un sistema de poleas.
- Se agregará un tercer pulsador en el centro de la pala de la mano, este ayudará a saber si es que se necesita tomar un objeto y cerrará la mano automáticamente, sin necesidad de control por parte del usuario.
- Se agregará movimiento de codo, para adaptarla a otro tipo de amputaciones.
- Se analizarán otros motores para ver si es posible reducir el amperaje que consume el circuito.
- Se probará la siguiente versión de la prótesis con una persona con amputación transradial, para escuchar su opinión acerca de está.

D. Plano del engrane con relación 1:1, utilizado para saber la posición de los dedos.



Nota Engranes. El paso diametral, diámetro de paso y el número de dientes de los engranes está especificado en los formulas del cálculo de relación de engrane, para cortar en los engranes en mdf, estos se escalaron hasta que la distancia entre los dos fuera de 16.33, para que embonaran en el holder. Todas las medidas aquí presentadas están en milímetros.

E. Uso del led RGB.

En este proyecto se utilizó el led RGB para saber qué movimiento de la mano se seleccionó.

Siendo los movimientos del Grupo 1 diferentes tonos de verde.

Grupo 2 diferentes tonos de rojo.

Grupo 3 diferentes tonos de azul.

Y la muñeca es color blanco.

F. Sensor con led y fotorresistencia.

Sensor y brazaletes de la imagen 72 y 73.

G. Tope de estireno y madera.

Tope de estireno y madera de la imagen 80 y adaptación con brazaletes de PET de la imagen 81.

H. Parámetros de las piezas impresas.

En la sección 3.7, se especifican los parámetros con los que se mandaron a imprimir las diferentes piezas utilizadas para la construcción de la mano.

J. Código control de la mano.

Este código que con un solo pulsador pueden hacer 13 diferentes tareas, también tiene la forma de controlar un servomotor grado por grado con solo mantener pulsaciones largas. Este pulsador sustituye a un potenciómetro, también una de las ventajas es que el pulsador es más económico.

```
void setup(){

  Serial.begin(9600);
  pinMode(2, INPUT); //Pulsador
  pinMode(pulsadorDedo, INPUT); //Pulsador
  attachInterrupt(1, DetenServos, RISING);
  pinMode(verde, OUTPUT); //11
  pinMode(azul, OUTPUT); //10
  pinMode(rojo, OUTPUT); //9
  miServo1.attach(4); //ANULAR Y PULGAR
  miServo2.attach(5); //MEDIO E INDICE
  miServo3.attach(6); //PULGAR
  miServo4.attach(7); //MUÑECA
  miServo5.attach(8); //D
  miServo1.write(0); //ANULAR Y PULGAR
  miServo2.write(0); //MEDIO E INDICE
  miServo3.write(0); //PULGAR
  miServo4.write(0); //MUÑECA
  miServo5.write(0); //D
  EstablecerColor(0,0,0);
}

void loop(){

  while(true){
    botomStatus = digitalRead(2);

    if (botomStatus == HIGH && botomAnterior == LOW) {
      status = status + 1; //verifica si el usuario a presionado el botom
      Serial.println("status:"); Serial.println(status);
      inicio_pulso = millis(); //esta funcion cuenta el tiempo pasado
      delay(25);
    }

    x=conurrencia%2;

    if(status != 0 && x==0 && conurrencia==80){
      compareTo=true; //Condicion que da luz verde a 1
      break;
    }

    if(status != 0){
      delay(25);
      conurrencia++; //conurrencia o concatenacion de las veces que paso, sirve pa
      //una vez el botom para verificar si se volvera a presionar o

      botomAnterior = botomStatus;
    }

    if(status ==1){ entero = 1;}
    if(status ==1 && statusP ==1.5){ entero = 2;} //gradosMAS
    if(status ==2){ entero = 3;}
    if(status ==2 && statusP ==2.5){ entero = 4;} //gradosMenos
    if(status ==3){ entero = 5;}
    if(status ==3 && statusP ==3.5){ entero = 6;}
```

```

.....
if(compareTo == true){ //Aqui valora la condicion si se cumplio una anterior

switch (entero)
{
case 1:
Serial.println("Clase1");
caso1++;//EstablecerColor(255,0,0);EstablecerColor(0,0,0);
Serial.print("Caso1-Contador:");
Serial.println(caso1);
if (caso2>=1){caso1=0;grados=0;Serial.println("Movimiento C2-M1");modos=21;EstablecerColor(0,0,255)
if (caso3>=1){caso1=0;grados=0;Serial.println("Movimiento C3-M1");modos=31;EstablecerColor(0,255,0)
if (caso1>1){Serial.println("Movimiento C1-M1");modos=11;EstablecerColor(255,0,0); if ( modoAnterior
status = 0;
compareTo=false;
conurrencia = 0;
entero=0;statusP=0;
break;

case 2: Serial.println("Clase2");
GradosMas();
break;

case 3:
Serial.println("Clase3");
caso2++;//EstablecerColor(0,0,255);EstablecerColor(0,0,0);
Serial.print("Caso2-Contador:");
Serial.println(caso2);
if (caso1>=1){caso2=0;grados=0;Serial.println("Movimiento C1-M2");modos=12;EstablecerColor(230,0,255);};//verde
if (caso3>=1){caso2=0;grados=0;Serial.println("Movimiento C3-M2");modos=32;EstablecerColor(0,255,80);};//morado
if (caso2>1){grados=0;Serial.println("Movimiento C2-M2");modos=22;EstablecerColor(0,255,255);};//rosa
status = 0;
compareTo=false;
conurrencia = 0;
entero=0;statusP=0;
break;

case 4:Serial.println("Clase4");
GradosMenos();
break;

case 5:
Serial.println("Clase5");
caso3++;//EstablecerColor(0,255,0);EstablecerColor(0,0,0);
Serial.print("Caso3-Contador:");
Serial.println(caso3);
if (caso1>=1){caso3=0;grados=0;Serial.println("Movimiento C1-M3");modos=13;EstablecerColor(255,50,120);}
if (caso2>=1){caso3=0;grados=0;Serial.println("Movimiento C2-M3");modos=23;EstablecerColor(20,0,255);}
if (caso3>1){grados=0;Serial.println("Movimiento C3-M3");modos=33;EstablecerColor(255,255,0);};//aqua
status = 0;
compareTo=false;
conurrencia = 0;
entero=0;statusP=0;
break;

case 6:
Serial.println("Clase6-Salida");
caso1=0; caso2=0; caso3=0;grados=0;EstablecerColor(0,0,0);
Serial.println("Caso1=");Serial.println(caso1);
Serial.println("Caso2=");Serial.println(caso2);
Serial.println("Caso3=");Serial.println(caso3);
status = 0;
compareTo=false;
conurrencia = 0;
entero=0;statusP=0;
break;

default:
Serial.println("Default");
Serial.println("Muñeca Activada");
EstablecerColor(255,255,255);//blanco
grados=ultimoGradoM;
modos=1;
status = 0;
compareTo=false;
conurrencia = 0;
entero=0;statusP=0;
break;
}
}

if (modos != 1){modoAnterior=modos;}

} //fin de modulo

```

```

void Modos() {

  if(modos == 11){
    miServo1.write(grados);//meniquel0
    ultimoGradoModo=grados;
  }
  if(modos == 12){
    miServo1.write(grados);//meniquel0
    miServo2.write(grados);//Indice9
  }
  if(modos == 13){
    miServo1.write(grados);//meniquel0
    miServo2.write(grados);//Indice9
    miServo3.write(grados);//medio6
    miServo4.write(0);//anular5
  }
  if(modos == 21){
    miServo1.write(grados);//meniquel0
    miServo2.write(0);//Indice9
    miServo3.write(0);//medio6
    miServo4.write(0);//anular5
  }
  if(modos == 22){
    miServo1.write(grados);//meniquel0
    miServo3.write(0);//medio6
  }
  if(modos == 23){
    miServo1.write(0);//meniquel0
    miServo2.write(0);//Indice9
    miServo3.write(0);//medio6
  }
  if(modos == 31){
    miServo3.write(0);//medio6
  }
  if(modos == 32){
    miServo4.write(0);//anular5
  }
  if(modos == 33){
    miServo1.write(0);//meniquel0
    miServo2.write(0);//Indice9
    miServo3.write(0);//medio6
    miServo4.write(0);//anular5
    //Nota en modo computadora tiene que dar doble click y click enves de sumar grados
  }
  if(modos == 1){
    miServo5.write(0);
    ultimoGradoM=grados;
    Serial.print("GradosMuñeca:");Serial.println(ultimoGradoM);
  }
}

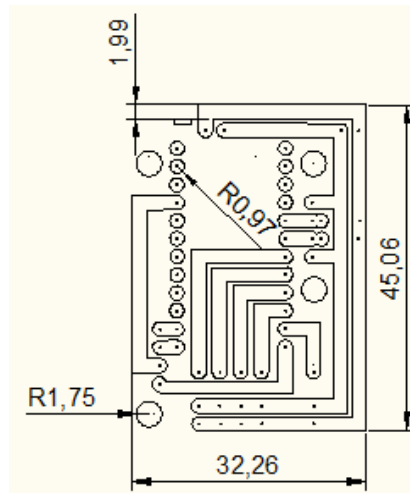
```

K. Pulsador en el dedo índice.

Agregar un pulsador para proteger a los motores de un sobre calentamiento, como se explica en la sección 9.2.3 en los pulsadores como se ilustra en la imagen 116.

L. Circuito.

Medidas del circuito especificadas en milímetros y conexiones de los elementos electrónicos para el armado de esté se indican en la imagen 118.



8. Glosario.

- ❖ **Prótesis.** Pieza o aparato artificial que se coloca en el cuerpo para sustituir a una parte que falta.
- ❖ **Muñón.** Extremo de un miembro del cuerpo después de haber sido cortado o amputado dicho miembro.
- ❖ **Robótica.** Es la rama de la ingeniería mecatrónica, eléctrica, electrónica, mecánica, biomédica y ciencias de la computación que se ocupa del diseño, construcción manufactura y aplicación de los robots.
- ❖ **Torque.** Momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia.
- ❖ **Relación de transmisión.** Es una relación entre las velocidades de rotación de dos engranajes conectados entre sí, donde uno de ellos ejerce fuerza sobre el otro.
- ❖ **Microcontrolador.** Circuito integrado programable, capaz de ejecutar las ordenes grabadas en su memoria.
- ❖ **Señal.** Variación de una corriente eléctrica u otra magnitud física que se utiliza para transmitir información.
- ❖ **Sensor mioeléctrico.** Sensor de señales mioeléctricas mide, filtra, rectifica y amplifica la actividad eléctrica de un músculo y produce una señal análoga que puede ser fácilmente leída por un microcontrolador.
- ❖ **Holder.** En este trabajo se refiere a el sujetador de un motor.
- ❖ **Grados de libertad.** Cada una de las variables necesarias para obtener los movimientos de un cuerpo en el espacio. El máximo de variables es de 6, cuando el número de grados de libertad es mayor se denomina redundancia.
- ❖ **Miembro superior.** Son llamados comúnmente brazos, están constituidos por clavículas, omóplatos, el húmero, el cúbito, los huesos del carpo, los huesos metacarpianos y las falanges. Las tres articulaciones del brazo son el hombro, el codo y la muñeca.
- ❖ **Interrupción en programación.** Suspensión temporal de la ejecución de un proceso, para ejecutar una subrutina de servicio de interrupción, la cual, por lo general, no forma parte del programa. Una vez finalizada dicha subrutina, se reanuda la ejecución del programa.

9. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, «La discapacidad en México,» INEGI, Aguascalientes, 2014.
- [2] IMSS, «Memoria Estadística 2016,» IMSS Mexico, 2016. [En línea]. [Último acceso: 23 marzo 2018].
- [3] Prótesis avanzadas, «Prótesis robótica a 3D,» Prótesis avanzadas, [En línea]. Available: <https://www.protesisavanzadas.co/copia-de-videos>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [4] Open Bionics, «Prótesis impresa en 3D,» Open Bionics, 2017. [En línea]. Available: <https://www.openbionics.com/shop/>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [5] bebionic, «The hand,» bebionic, [En línea]. Available: http://es.bebionic.com/the_hand/. [Último acceso: 22 marzo 2018].
- [6] The biorobotics institute, « Artificial Hands,» Scuola Superiore Sant'Anna, 2014. [En línea]. Available: http://sssa.bioroboticsinstitute.it/research/artificial_hands. [Último acceso: 2 abril 2018].
- [7] Sin Embargo, «Empresa mexicana diseña prótesis biónicas de bajo costo,» 07 julio 2016. [En línea]. Available: <http://www.sinembargo.mx/07-10-2016/3101478>. [Último acceso: 03 Abril 2018].
- [8] probionics, «diseño y desarrollo de organos artificiales,» [En línea]. Available: <http://www.probionics.com.mx/>. [Último acceso: 03 mayo 2018].
- [9] Instituto Mexicano de Rehabilitación Protésica, «Protesis de manos y dedos,» [En línea]. Available: http://protesis.mex.tl/258390_Fabricacion-de-Protesis-de-Extremidades.html. [Último acceso: 03 mayo 2018].
- [10] Comprehensive Prosthetics & Orthotics, «Upper Extremity,» cpousa, 218. [En línea]. Available: <http://www.cpousa.com/prosthetics/upper-extremity/>. [Último acceso: 22 11 2018].
- [11] D. C. A. G., «Prótesis de Miembros Superiores,» arcesq, 2005. [En línea]. Available: <http://www.arcesw.com/pms1.htm>. [Último acceso: 22 marzo 2018].
- [12] ResearchGate, «Prótesis estéticas,» research Gate, Junio 2013. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Protesis-esteticas-21_fig1_312081540. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [13] J. M. D. GONzales, «ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES,» *Revista Digital Universitaria*, vol. 6, nº 1, pp. 8-10, 2004.

- [14] Medical Expo, «Prótesis de mano activa eléctrica / pinza gancho / para adulto,» steeper, [En línea]. Available: <http://www.medicaexpo.es/prod/rlsteeper/product-74956-458252.html>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [15] Desconocido, «Estado del Arte,» Monografias.com S.A., 2013. [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos109/estado-del-arte-protesis-manos/image006.jpg>. [Último acceso: 22 marzo 2018].
- [16] Illinois Prosthetics Technology, «Types of Arm Prosthesis,» White Paper. JPX, 29 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://supportipt.org/types-of-arm-prosthesis/>. [Último acceso: 22 marzo 2018].
- [17] Wikipedia, «Miembro superior,» Wikipedia la enciclopedia libre , 23 octubre 2017. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Miembro_superior. [Último acceso: 23 marzo 2018].
- [18] M. Chimborazo, «Miembros Superiores,» Maritza Chimborazo Estrella, 9 febrero 2015. [En línea]. Available: <https://maritzachimborazo.wordpress.com/2015/02/09/miembros-superiores/>. [Último acceso: 23 03 2018].
- [19] A. Z. D. Miguel, «Biblioteca universal,» 2011. [En línea]. Available: http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/dise%C3%B1o-construccion-mano-robotica-ense%C3%B1anza-alfabeto-dactilologico-universal-personas-sordomudas/id/69849136.html. [Último acceso: 13 abril 2018].
- [20] Desconocido, «El pulgar,» 2010. [En línea]. Available: http://wzar.unizar.es/acad/cinesio/Documentos/Pulgar_Apuntos_2010.pdf. [Último acceso: 11 abril 2018].
- [21] Aprendiendo Arduino, «Sensores Arduino,» wordpress, 2 julio 2016. [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/07/02/sensores-arduino/>. [Último acceso: 24 marzo 2018].
- [22] Gabriela/Medicionees, «Sensores resistivos,» Word Press, [En línea]. Available: <https://gabrielamorales.wordpress.com/sensores-resistivos/>. [Último acceso: 24 marzo 2018].
- [23] R. A. Alvarez, «SENSORES MECÁNICOS,» Blogger, 22 febrero 2012. [En línea]. Available: <http://automatizacionindustrialiue.blogspot.mx/2012/02/sensores-mecanicos.html>. [Último acceso: 24 marzo 2018].
- [24] M. e. C. E. A. F. Martinez, «Instrumentación, Acondicionamiento de sensores resistivos,» IPN, 2016. [En línea]. Available: <http://www.eafranco.com/docencia/instrumentacion/files/practicas/02/Practica02.pdf>. [Último acceso: 28 marzo 2018].

- [25] Electrónica: teoría y práctica, «Características Arduino Nano 328,» Electrónica: teoría y práctica, 2012. [En línea]. Available: <http://electronica-teoriaypractica.com/caracteristicas-arduino-nano-328/>. [Último acceso: 25 marzo 2018].
- [26] Tu electronica, «Como conectar un pulsador en Arduino,» TuElectronica.es, 29 noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://tuelectronica.es/como-conectar-un-pulsador-en-arduino/>. [Último acceso: 28 marzo 2018].
- [27] Electrónica Unicrom, «Eliminador de rebote con 555,» Electrónica Unicrom, 2016. [En línea]. Available: <https://unicrom.com/eliminador-de-rebote-con-555/>. [Último acceso: 28 marzo 2018].
- [28] Wikipedia, «Algoritmo de agrupamiento,» Wikipedia, 1 septiembre 2017. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_de_agrupamiento. [Último acceso: 28 marzo 2018].
- [29] J. t. Kate, «FA3D Hand,» Thingiverse, 17 septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:1947210>. [Último acceso: 1 abril 2018].
- [30] 90srobot, «Partial hand prosthesis.,» Thingiverse, 3 octubre 2017. [En línea]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2565845>. [Último acceso: 01 abril 2018].
- [31] Open Bionics, «Ada Robotic Hand,» Thingiverse, 26 junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:1294517>. [Último acceso: 01 abril 2018].
- [32] Gyrobot, «Flexy Hand,» Thingiverse, 4 marzo 2014. [En línea]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:242639>. [Último acceso: 01 abril 2018].
- [33] Gyrobot, «Flexy Hand- Filaflex Remix.,» Thingiverse, 10 abril 2015. [En línea]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:754513>. [Último acceso: 01 abril 2018].
- [34] J. M. D. G. Julio Cesar Díaz Montes, MECANISMOS DE TRANSMISIÓN Y ACTUADORES UTILIZADOS EN, CD. OBREGÓN, SONORA: SOMIM, 2009.
- [35] Wikipedia, «Motor de corriente continua,» 10 abril 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_corriente_continua. [Último acceso: 3 mayo 2018].
- [36] Wikipedia, «Motor serie,» 17 marzo 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_serie. [Último acceso: 03 mayo 2018].
- [37] Wikipedia, «Motor compound,» 27 septiembre 2017. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_compound. [Último acceso: 03 mayo 2018].
- [38] Wikipedia, «Motor shunt,» 01 junio 2017. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_shunt. [Último acceso: 03 mayo 2018].

- [39] Wikipedia, «Motor eléctrico sin escobillas,» 29 junio 2017. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_el%C3%A9ctrico_sin_escobillas. [Último acceso: 04 mayo 2018].
- [40] Wikipedia, «Motor paso a paso,» 2 mayo 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_paso_a_paso. [Último acceso: 04 mayo 2018].
- [41] robodacta, «Servomotor Micro SG90 9G,» ROBODACTA, 2018. [En línea]. Available: <https://store.robodacta.mx/servomotores/powerhd-goteck/servomotor-micro-sg909g/>. [Último acceso: 03 abril 2018].
- [42] Pololu, «Micro Metal Gearmotors,» Pololu Corporation, 2018. [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/category/60/micro-metal-garmotors>. [Último acceso: 3 abril 2018].
- [43] EcuRed, «Mecanismos,» EcuRed, 2018. [En línea]. Available: <https://www.ecured.cu/Mecanismo>. [Último acceso: 5 abril 2018].
- [44] Bio Robotis Lab, «Exoskeleton,» WordPress, 2015. [En línea]. Available: <http://robot.kut.ac.kr/>. [Último acceso: 10 04 2018].
- [45] C. Silva, «CONTADOR DE PULSOS DE ENCODER CON ARDUINO,» Ingeniería creativa, [En línea]. Available: <http://carolina-sp.blogspot.mx/2014/11/contador-de-pulsos-de-encoder-con.html>. [Último acceso: 11 Abril 2018].
- [46] Logicbus, «Encoder TR2,» Logicbus, 2015. [En línea]. Available: <http://www.logicbus.com.mx/encoder-TR2.php>. [Último acceso: 11 abril 2018].
- [47] E. Nieto, «Sensores relativo y absolutos,» Fidestec, 2018. [En línea]. Available: <https://fidestec.com/blog/sensores-relativos-y-absolutos/>. [Último acceso: 11 abril 2018].
- [48] Compañía Levantina de Reductores, «Tipos de encoders y aplicaciones en motores,» Compañía Levantina de Reductores S.L., 28 septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://clr.es/blog/es/tipos-de-encoders-aplicaciones-motores/>. [Último acceso: 11 abril 2018].
- [49] Electronica Basica, «¿Cómo funciona un circuito electrónico?,» Electronica Basica, [En línea]. Available: <http://www.electronica-basica.com/circuito-electronico.html>. [Último acceso: 14 abril 2018].
- [50] Enrique, «LED RGB Arduino: Usar LEDs RGB De Ánodo Común,» TUTORIALES DE ARDUINO, 10 octubre 2015. [En línea]. Available: <http://www.educachip.com/led-rgb-arduino-anodo-comun/>. [Último acceso: 14 abril 2018].
- [51] Arduino, «Señales analógicas de salida en Arduino (PWM),» Arduino, 2018. [En línea]. Available: <https://playground.arduino.cc/ArduinoNotebookTraduccion/Appendix3>. [Último acceso: 14 abril 2018].

- [52] eis, «PLA,» eis.uva.es, [En línea]. Available: <http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/pla.htm>. [Último acceso: 15 abril 2018].
- [53] quecartucho.es, «Que es y que se puede hacer con el filamento flexible de impresoras 3D,» quecartucho.es, [En línea]. Available: <https://quecartucho.es/blog/que-es-y-que-se-puede-hacer-con-el-filamento-flexible-de-impresoras-3d/>. [Último acceso: 15 abril 2018].
- [54] D. M. P. Ti, «Calcular relacion de tren de engranaje sencillo en Solidworks 2015,» YouTube, 10 enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=iFYf7FhucRI&t=205s>. [Último acceso: 03 mayo 2018].
- [55] Desconocido, «Engranajes,» 2016. [En línea]. Available: <https://previa.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/elementos/Tema08.pdf>. [Último acceso: 12 12 2018].
- [56] Proveedores industriales, «Engranajes,» webmaster.com.mx, 2017. [En línea]. Available: https://www.dirind.com/dim/monografia.php?cla_id=23. [Último acceso: 12 abril 2018].
- [57] Ingeniería mecafenix, «Tipos de motores eléctricos,» WP Puzzle, 2018. [En línea]. Available: <http://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/tipos-motores-electricos/>. [Último acceso: 03 04 2018].
- [58] Corel Corporation, «Extensión del archivo .OBJ,» ReviverSoft, 2018. [En línea]. Available: <https://www.reviversoft.com/es/file-extensions/obj>. [Último acceso: 29 marzo 2018].
- [59] Wikipedia, «STL (file format),» STL (file format), 16 marzo 2018. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/STL_%28file_format%29. [Último acceso: 29 marzo 2018].

Apéndice 1.

Mecanismos por Engranajes.

Una rueda dentada es utilizada para transmitir un movimiento giratorio alternativo y/o fuerza desde una parte de una maquina a otra. Un conjunto de dos o más engranes que transmiten movimiento de un eje a otro se denomina tren de engranajes. [43]

Pueden incrementar la fuerza de torque de un actuador como lo hacen las cajas de engranaje o cajas reductoras.

Ejemplo de tren de engranaje simple.



Imagen 129. Piñón y corona. Tomada de [43]

El piñón es el engrane más pequeño de un par de ruedas dentadas, al engrane más grande se le llama corona, plato o estrella, estos forman parte de un mecanismo reductor de velocidad.

Terminología característica usada en los engranes.

En la siguiente imagen se presentan distintos términos que conforman un engrane.

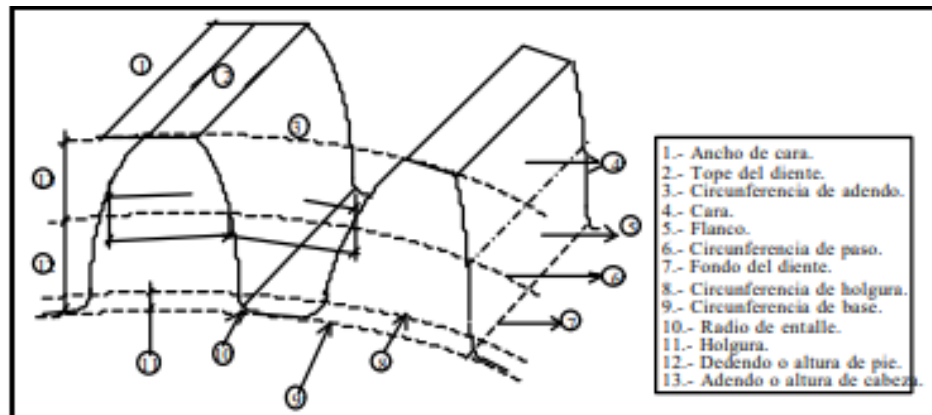


Imagen 130. Nomenclatura de los engranes. Tomada de [55]

A continuación, se define la nomenclatura de un engrane:

- Diámetro de paso o circunferencia primitiva (PD): Determina la relación de transmisión, contacto entre los dientes. Las circunferencias primitivas de dos engranajes son tangentes entre sí.
- Paso circular: Es la distancia media sobre la circunferencia primitiva entre un determinado punto de un diente y el punto correspondiente de un diente determinado.
- Modulo: Es el cociente del diámetro de la circunferencia primitiva y el número de dientes.
- Paso diametral (DP): Razón entre el número de dientes y el diámetro de paso.



Imagen 131. Gala de los pasos diametrales. Tomada de [56]

- Adendo: Es la distancia radial entre el tope del diente y la circunferencia primitiva.
- Dedendo: Distancia radial desde la circunferencia primitiva hasta la circunferencia de base.
- Altura total: Suma del dedendo más el adendo.
- Circunferencia de holgura: Circunferencia tangente a la del adendo cuando los dientes están conectados.
- Holgura: Diferencia entre el adendo y el dedendo.
- Juego: Diferencia entre el ancho de espacio y el grueso del diente.
- Anchura de cara: Longitud de los dientes entre la dirección axial.
- Cara: Superficie lateral del diente, limitado por la circunferencia primitiva y del adendo.
- Flanco: Superficie lateral del diente limitada por la circunferencia primitiva y del dedendo.

- Superficie de fondo: Superficie de la parte inferior del espacio entre los dientes continuos.
- Radio de entalle: Radio de la curva de empotramiento del diente en el engrane.
- Angulo de acción: Angulo que gira el engrane cuando entra en contacto un par de dientes hasta terminar su contacto.
- Angulo de aproximación: Angulo que gira un engrane desde el instante en que dos dientes entran en contacto, hasta que ambos dientes contactan en el punto del diámetro primitivo.
- Angulo de alejamiento: Angulo que gira un engranaje desde que los dientes están en contacto en el punto del diámetro primitivo hasta separarse. [55]

Apéndice 2.

Costos del proyecto.

En la siguiente tabla se muestra el precio de las cosas utilizadas para el proyecto.

Sensores.			
Presión	\$210	Flexión	\$490
Fotorresistencia	\$7	Pulsadores	\$16
Electrónica.			
Resistencias varias	\$40	Leds	\$30
Led RGB	\$14	Arduino nano	\$180
Arduino por min	\$110	Módulo TTL	\$70
Protoboard	\$70	Servomotores	\$280
Placa de baquelita	\$30	Cable	\$30
Cautín	\$70	Soldadura 3m	\$21
Micromotorreductores			
Pololu 5:1	\$300	Pololu 10:1	\$180
Pololu 30:1	\$180	Pololu 1000:1	\$480
Genérico 1000:1	\$100		
Impresora 3D.			
Filamento Flexible 250g	\$180	Filamento PLA 1Kg	\$450
Pasajes y viáticos.			
Pasajes	\$2500	Viáticos	-----
Otros.			
Tornillos Allen.	\$30	Tuercas.	\$15
Llave Allen.	\$20		
Total. \$6103			

Nota. Todo está denominado en pesos mexicanos.