

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

PRÓTESIS ELECTROMECAÁNICA IMPRESA EN 3D

Trabajo de Titulación para optar al Título de
TÉCNICO UNIVERSITARIO EN ELECTRÓNICA

Alumno:

Diego Ignacio Porras Lobos

Profesor Guía:

Mag. Guelis Darío Montenegro Zamora

2022

RESUMEN

Este trabajo de título consiste en una prótesis electromecánica, lo más parecido a una mano humanoide, ya que se compone de 5 falanges totalmente impresas en 3D, impulsados por diferentes componentes que serán expuestos posteriormente en este informe con sus debidas características y su debida utilización.

Se presentan los objetivos generales y específicos de este proyecto de título, para luego realizar la fabricación e implementación de cada etapa, se deben realizar pruebas para detectar el funcionamiento de la prótesis en diferentes situaciones, las son completadas con éxito, pero con ligeras modificaciones al concluir cada una de ellas. Cuando se finalizan las pruebas, se tiene que analizar los resultados se implementan nuevas modificaciones y a si llegar al producto final.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: PRÓTESIS ELECTROMECAICAS	3
1.	4
1.1.	4
1.1.1.	4
1.1.2.	8
1.1.3.	9
1.2.	10
1.2.1.	10
1.2.2.	10
1.2.3.	11
1.3.	11
1.3.1.	11
1.3.2.	11
1.3.3.	12
1.4.	12
1.5.	13
1.5.1.	14
1.5.2.	14
1.6.	14
CAPÍTULO 2: CONSTRUCCIÓN DE PRÓTESIS	17
2.	17
2.1.	17
2.1.1.	21
2.2.	24

2.2.1.	25	
2.2.1.1. Arduino:		26
2.2.2.	27	
2.2.3.	28	
2.3.	29	
2.4.	31	
CAPÍTULO 3: PRUEBAS Y RESULTADOS		33
3.	34	
3.1.	34	
3.1.1.	36	
3.1.2.	37	
3.1.3.	38	
3.2.	39	
3.2.1.	40	
3.2.2.	40	
3.2.3.	42	
3.3.	44	
3.4.	46	
CONCLUSIÓN		45
BIBLIOGRAFÍA		46
ANEXO		48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mano Ortopédica Ambroise Pare 1564	5
Figura 1.2 Mano Utah/Mit 1982	6
Figura 1.3 Mano Ultralight 2000	7
Figura 1.4 Mano GiFu 2001	8
Figura 2.1 Huesos de la mano	18
Figura 2.2 Diseño de antebrazo Fusion 360	19
Figura 2.3 Diseño de palma Fusion 360	19
Figura 2.4 Diseño de falanges Fusion 360	20
Figura 2.5 Diseño base de pulgar Fusion 360	20
Figura 2.6 Diseño base de palma Fusion 360	21
Figura 2.7 Proceso de modelado e impresión 3D	22
Figura 2.8 Antebrazo Slicer Ultimaker Cura	22
Figura 2.9 Relleno Antebrazo Slicer Ultimaker Cura	23
Figura 2.10 Impresión de palma en 3D	23
Figura 2.11 Diagrama de bloque del sistema	24
Figura 2.12 Placa Arduino UNO	26
Figura 2.13 Diagrama de pines digitales y analógicos de Arduino UNO	26
Figura 2.14 Placa Sensor Shield	27
Figura 2.15 Diagrama de flujo de la función del código	29
Figura 2.16 Servo motor MG996R	30
Figura 2.17 Disco 25 dientes	30

Figura 2.18 Servomotor SG90	31
Figura 2.19 Diagrama de conexión de la prótesis	32
Figura 3.1 Brazo completamente implementado	34
Figura 3.2 Especificaciones de la fuente de poder	36
Figura 3.3 Extracto del código que muestra la configuración de movimiento a partir de potenciómetros	39
Figura 3.4 Prótesis realizando un puño	41
Figura 3.5 Prótesis contando hasta 3	41
Figura 3.6 Placa Arduino UNO con sensor Shield	42
Figura 3.7 Arduino con sensor Shield junto a la fuente de poder externa	43
Figura 3.8 Sensor EMG	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Comparativa Servomotores	15
Tabla 2.1. Organización de motores por pin	28
Tabla 3.1 Grados de movimiento por Intensidad de corriente	37
Tabla 3.2 Costos de impresión	46
Tabla 3.3 Costos de compra de productos	47
Tabla 3.4 Costos Totales	47

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1 Formula para el cálculo de Intensidad total	35
--	----

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

A. SIGLA

MIT: Instituto Tecnológico de Massachusetts.

EMG: Electromiográfico.

3D: 3 Dimensiones; Tridimensional.

CAD: Diseño asistido por computadora.

CAM: Manufactura asistida por computadora.

STL: Estereolitografía.

CNC: Control numérico por computadora.

IDE: Entorno de desarrollo integrado.

PWM: Modulación de ancho de pulso.

GND: Ground.

PLA: Ácido poliláctico

B SIMBOLOGÍA

360°: Un giro de 360 grados; Una vuelta completa.

Mm/seg: Milímetros por segundo.

%: Símbolo de porcentaje.

V: Voltaje.

A: Amperio.

Kg/cm: Kilogramos por centímetro.

W: Watts

MHz: Megahercio

Kb: Kilobyte

I2C: Circuito Inter integrado

mA: Miliamperio

mm: Milímetro

INTRODUCCIÓN

En la sociedad contemporánea en la que se está, se han desarrollado grandes avances para las comunidades, adentrado cada día más en la dependencia de la tecnología, que día a día sorprende por las distintas ideas innovadoras, cómo se viene haciendo gracias a los nuevos aportes que se han entregado durante la historia, en la cual los investigadores actuales pueden seguir desarrollando.

Un gran avance tecnológico ha sido la investigación sobre las prótesis electromecánicas que es un avance de gran importancia en lo que innovación se refiere, intentando satisfacer una necesidad que es primordial para el ser humano, en el cual le entrega más independencia, ya que al proporcionar la compensación de la mano a través de una prótesis para la extremidad superior, entrega a las personas confianza y seguridad, gracias a esta autovalencia frente a situaciones que antes pudieron significar todo un desafío, provocando que las vidas de las personas cambie por completo. Sin embargo, gracias a los distintos investigadores se puede avanzar aún más en la adaptación y ayuda en la recuperación abriéndole variadas oportunidades.

En contexto nacional e internacional que ha dejado a su paso la pandemia, uno de ellos la crisis económica a nivel mundial ha imposibilitado la adquisición de tecnología para distintas familias de escasos recursos que han sido fuertemente golpeadas con este fenómeno, para ello se presenta una alternativa de bajo costo en materias primas y mano de obra, obteniendo un resultado accesible para cualquier ser humano que lo desee adquirir, tomando en cuenta los distintos avances que han realizado distintos investigadores dentro de la historia, ocupando como antecedentes primordiales para base de la construcción de la mano robótica.

Otro punto relevante es la crisis medioambiental, en el que para muchas personas es fundamental la adquisición de productos capaces de ser reciclados, debido a ello se pensó en materiales que posteriormente de cumplir su vida útil, serán puestos en un proceso de reciclaje.

CAPÍTULO 1: PRÓTESIS ELECTROMECÁNICAS

1. PRÓTESIS ELECTROMECÁNICAS

En este capítulo se presentan las alternativas históricas de las prótesis electromecánicas con más relevancia dentro de la comunidad científica, aportando ideas que se toman de base para adentrarse al trabajo de título. Además, se estudia la actualidad nacional e internacional buscando distintas problemáticas para su posterior solución.

1.1. ANTECEDENTES

Para conocer el contexto de la prótesis electromecánica se incursiona en los registros de los antepasados que han dejado huellas, que ayudan a la creación de distintas formas en que se puede desarrollar la mano robótica.

1.1.1. Historia

La construcción de las manos robóticas evolucionado a través del tiempo, donde cada investigador ha sumado ideas nuevas desde el diseño, construcción y concepción del prototipo de prótesis mecánicas, que ha sido fuente de investigación transversal que dio inicio en sus primeros pasos en *“1564 en París, en donde Pare Ambroise publica el primer diseño de una mano mecánica, que imitaba a una mano real con músculos mecánicos”* (Zeas & Zuñiga Tenesaca, Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para las personas sordomudas, 2011).

Este gran hito, que marcó gran parte de la historia de la robótica, no pudo ser concretado dejándolo en un estado inconcluso, que luego de 300 años se retomó la investigación llevándolo a un ámbito industrial como se puede observar en la figura 1.1, donde se muestra un prototipo que se ocupaba en la enseñanza por parte de los trabajos en conjunto de distintas instituciones, grupo y entidades, en las cuales se tenía una visión filantrópica al pensar en todos los significativos avances en temas de la rehabilitación de personas, gracias a la implementación de prótesis electromecánicas.

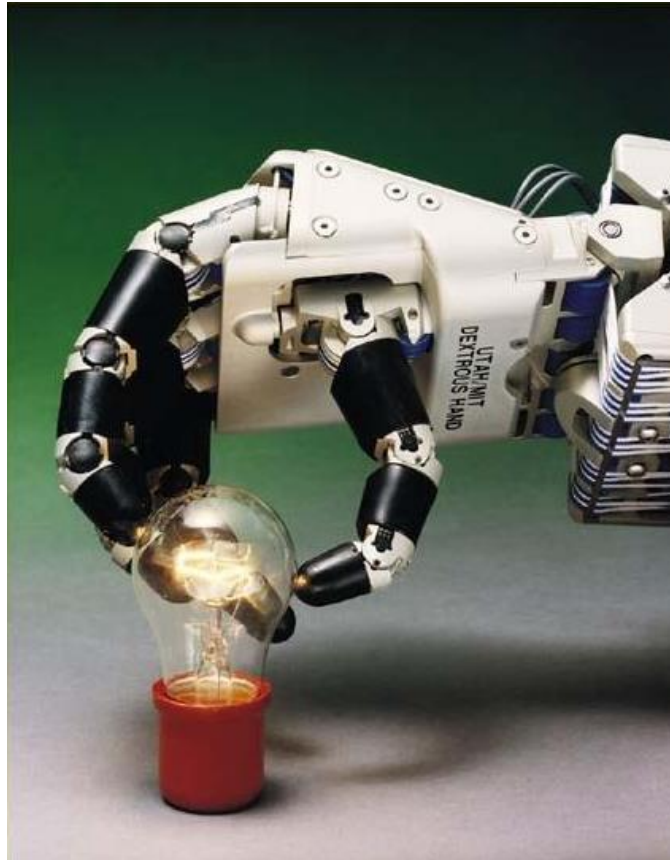


Fuente: Zeas & Zuñiga Tenesaca, *Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para las personas sordomudas*, 2011

Figura 1.1 Mano Ortopédica Ambroise Pare 1564

A mediados de los años 80, en el Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT) “desarrolló un antebrazo con actuadores neumáticos que mueve cada una de las articulaciones mediante un arreglo de tendones conducidos por poleas.” (Zeas & Zuñiga Tenesaca, *Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para las personas sordomudas*, 2011) Para la comunidad científica el método que se utilizó para el

desarrollo de Utah/Mit (mano robótica), demostrado en la figura 1.2, tuvo gran impacto debido a sus poleas accionadas por actuadores neumáticos, método utilizado hasta el día de hoy. Además, usándose como referencia en los trabajos de la universidad de Kentucky demostrado en la implementación de servomotores en cada uno de los 3 dedos en conjunto de cables de acero flexible.



Fuente: Zeas & Zuñiga Tenesaca, Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para las personas sordomudas, 2011

Figura 1.2 Mano Utah/Mit 1982

Entrando ya al siglo XXI, las diferentes percepciones de los científicos en los aspectos físicos ya daban atisbos de lo que sería la prótesis, ya más acorde a la fisonomía humanoide, esto comienza en el centro de investigación de Karlsruhe en Alemania.

“Se desarrolló una mano artificial llamada Ultralight, de muy bajo peso y con 5 falanges” (Zeas & Zuñiga Tenesaca, *Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para las personas sordomudas*, 2011), *cómo se puede observar en la figura 1.3*



Fuente: Zeas & Zuñiga Tenesaca, Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para las personas sordomudas, 2011

Figura 1.3 Mano Ultralight 2000

Más tarde, en Japón, se estuvo desarrollando una mejor la idea de la prótesis con 5 dedos, como se ve en la figura 1.4, siendo ésta manejada por servomotores ubicados en la palma. La disposición de los dedos, símil a la de los humanos, permite variados grados de libertad en el movimiento.



Fuente: Zeas & Zuñiga Tenesaca, Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para las personas sordomudas, 2011

Figura 1.4 Mano GiFu 2001

1.1.2. Actualidad mundial

Actualmente, existen diversos avances en lo referente a prótesis electromecánicas muy semejantes y con características cada vez más cercanas a las de una extremidad real. Numerosos avances a nivel mundial han proporcionado fuertes innovaciones que han ayudado con mejoras sustanciales para la extremidad superior, ocupando sensores como electromiográficos, electroencefalógrafos y hasta flexo-sensores, además, se usan materiales inteligentes y actuadores; motores, ejes y poleas.

“Entre los avances realizados recientemente, podemos encontrar el realizado en Japón por la compañía Exii, quienes diseñaron un prototipo de un valor aproximado de 30.000 yenes (220 euros). Esta prótesis permite coger objetos con facilidad sin emplear complejos y costosos sistemas, como la conexión cerebral o el movimiento independiente de cada dedo mecánico. Esta simplicidad técnica, permite construir modelos más económicos.” (Nikkei, 2015)

Otras investigaciones arrojan el implemento de los sensores como enfoque principal ayudando a reflejar movimientos que corresponden a los que ejerce una persona con pleno uso de sus extremidades, este sensor se llama, EMG, mejorando la adaptación al uso cotidiano del día a día.

1.1.3. Actualidad Chilena

En la actualidad chilena ha sido difícil encontrar material público sobre investigaciones científicas sobre prótesis robóticas, aún es un campo al que no se la ha sacado el mejor provecho debido a diferentes circunstancias. Uno de los trabajos que se pudo encontrar en la cual está concretado y expuesto en forma mediática viene por parte de la Universidad Católica, donde un grupo de 3 estudiantes desarrollaron una mano robótica gracias a la tecnología de impresión 3D. *“El proyecto llamado High-Five cuya expresión en español significa “choca esos cinco”, busca devolver a personas con discapacidad la sensación y funcionalidad de las extremidades superiores, en especial de quienes han sufrido una amputación.”* (Prensa y comunicaciones Ingeniería UC, 2016)

La extremidad fabricada es accionada por servomotores, los que son implementados junto a sensores que toman los movimientos del músculo y los transforman en impulsos eléctricos que dan muestra a través de un software el movimiento a realizar por la prótesis.

1.2. PROBLEMÁTICAS

A continuación, se presentarán las distintas dificultades que se tienen hoy en día sobre la construcción e investigación de las prótesis robóticas, que por consecuencia hace dificultoso el proceso de acceso a información referente a la función, adquisición y manufactura, debido a:

1.2.1. Acceso a la información

La poca centralización de información, es decir, que no existe mucha accesibilidad debido a los distintos medios que se ocupan para exponer los conocimientos, provoca una exhaustiva investigación aumentando el tiempo empleado para la búsqueda de fuentes teóricas que hacen retrasar el proceso de adquisición de conocimiento, lo que consigue que diferentes personas no se sumerjan en el tema debido a esta problemática, ya que el tiempo que normalmente se ocupa para la investigación del marco teórico, se tiende a ver aumentado, lo que conduce a algunos al abandono de la investigación.

1.2.2. Carencia en inversión por parte de los gobiernos nacionales

Existe poco incentivo financiero dedicado a instituciones y personas naturales para fomentar la investigación, el descubrimiento y apoyo a nuevos líderes en Chile.

La prioridad en cuanto al impulso de nuevas formas de innovación se ha visto climatizada, y mayormente hoy en día por la actual pandemia, pero sin perder de vista el historial que viene arrastrando hasta estos días, en la que el avance enfocado a la rehabilitación y apoyo a personas con alguna discapacidad física ha quedado desactualizada y monopolizada a un sector más acomodado. Dando paso a entidades privadas al desarrollo de estas tecnologías, privatizando el conocimiento adquirido a base de sus investigaciones.

1.2.3. Valor elevado de fabricación

Durante el proceso de fabricación se ha encontrado los altos costos de la materia prima y activos fijos a nivel nacional. En consecuencia, se ha tenido que recurrir al comercio extranjero para su obtención, teniendo en contra el extenso tiempo de envío de los productos al país.

Actualmente, esto se ve incrementado mucho más debido al contexto al que se está sujeto hoy en día por la pandemia, lo que ha significado el aumento de los costos tanto monetarios como de tiempo de traslado de la materia prima.

1.3. POSIBLES SOLUCIONES

Debido a las distintas problemáticas vistas con anterioridad, se presenta variadas soluciones buscando resolver cada una de ellas.

1.3.1. Solución al acceso de la información

Una de las posibles soluciones que se propone es la creación de un repositorio libre, en el cual se logre reunir las distintas ideas innovadoras alrededor del mundo orientadas a la ayuda de personas con la intención de ir complementado y facilitando ideas teóricas en temas de prótesis.

1.3.2. Solución a la carencia de inversión por parte de gobiernos

La solución que se plantea en este trabajo de título, es la de generar concientización e incentivar a nuevas mentes chilenas a la importancia que avoca a las tecnologías actuales en temas de rehabilitación. Posteriormente, crear programas nacionales gratuitos o facilitar apoyo económico a los futuros avances revolucionarios orientados a este tema.

1.3.3. Solución a la obtención de productos

La solución que se presenta para aminorar costos, tanto directos como indirectos, es el aquí expuesto para la realización de este trabajo de título. En primer lugar, se propuso la obtención de materia prima a través del comercio extranjero en el cual el valor de los productos es significativamente menor respecto a su contraparte nacional. En segundo lugar, en la construcción del sistema físico se implementó el PLA como pilar fundamental gracias a la impresión 3D, aminorando tiempo y costos significativos de construcción. En tercer lugar, la compra de los elementos internos, como servomotores, poleas, herramientas de sujeción y demás elementos que permiten la acción de la prótesis se realiza en el mercado nacional.

1.4. PROPUESTA ELEGIDA

Desde la globalización de la electrónica del siglo anterior y exponencialmente más ahora ya entrados en el actual, los avances referentes a la electrónica siempre han apuntado a un único gran objetivo, mejorar la calidad de vida de las personas, siendo este el eje principal de los avances contemplados en este trabajo de título, proponiendo la implementación de una mejora de las prótesis. En específico para esta ocasión una mano robótica, a base de material impreso en 3D, destinado para personas que no tengan acceso a un sistema de salud competente, que pueda cubrir con sus necesidades.

El proyecto surge debido a la facilidad que otorga la impresión 3D en el ámbito de la tecnología, acercando a cualquier persona con acceso a una impresora el desarrollo de cualquier proyecto que se tenga en mente, pero eventualmente se llega a la pregunta: ¿En qué forma una herramienta como lo es la impresión 3D, la que es una ayuda para proyectos personales, permite el desarrollo de un proyecto enfocado a facilitar la ayuda a otros?

La mano robótica consta con variados componentes que ayudan para el movimiento articulado de cada dedo, todo esto desarrollado bajo la impresión 3D, en este trabajo la composición de la mano contendrá la palma con sus 5 dedos simulando a una mano humana, en el ante brazo contendrá los 4 servomotores MG996R que serán de ayuda para el movimiento de cada una de las falanges que más adelante se explica con detalle como es el funcionamiento de cada uno de ellos. Además, en la palma se encuentra un quinto servomotor que ayudará para el movimiento del dedo pulgar, en la cual es de suma importancia por la fisionomía humana, siendo el mayor exponente de la evolución humana, el pulgar opuesto.

La simulación de un tendón humano está compuesta por un cable de hilo de pescar que ayuda a realizar un movimiento que normalmente se está acostumbrado a hacer con nuestra extremidad superior.

En adición, el prototipo estará pensado netamente en la recreación o similitud humanoide que ayudará a los humanos en los aspectos psicológicos al asimilar la prótesis a una extremidad como acostumbramos de observar en la población reforzando la sensación de uniformidad, confianza e independencia, generando autonomía gracias a una prótesis funcional.

1.5. OBJETIVOS

A continuación, se procede a exponer la intención de este proyecto de título abarcando el objetivo general y enumerando los objetivos específicos del mismo.

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar una prótesis inteligente para proporcionar a las personas con dificultades la posibilidad de un prototipo de prótesis robótica, enfocado al bajo costo económico.

1.5.2. Objetivos específicos

1. El estudio de las diversas alternativas que entrega el mercado internacional.
2. Comparar las opciones existentes, observando las desventajas de cada propuesta estudiada.
3. Dar a conocer las distintas soluciones
4. Escoger, adecuar y probar la solución óptima para este trabajo de título.
5. Análisis de los costos económicos para la creación de un prototipo económico e innovador.

1.6. INTRODUCCIÓN A LOS COMPONENTES:

A continuación, se presentan grandes rasgos, los principales componentes que se ocupan en la prótesis electromecánica que son de gran ayuda para el desarrollo y funcionamiento. En el siguiente capítulo se adentra y se especifica con más detalle dichos componentes.

En primer lugar, tenemos al Arduino Uno que es una placa que incorpora al microcontrolador ATmega 328P, posee una velocidad de reloj de 16 MHz ayudando a procesar el código implementado para desarrollar la mano electromecánica, en el cual se almacena en la placa gracias a su memoria de 32 Kb, además la placa cuenta con 14 pines para señales digitales y 6 pines para señales analógicas. El voltaje de trabajo del Arduino uno es de 5V.

En segundo lugar, se cuenta con el sensor Shield, placa auxiliar que redistribuye los pines del Arduino para tener acceso a alimentación, tierra y señal, que facilita la implementación de la prótesis. También, ayuda para la implementación de una fuente externa, ya que el Arduino Uno por sí solo no va a poder entregar la suficiente potencia, solo entrega 1 mA. Dentro de sus características más relevantes se encuentra la interfaz I2C, entrada hasta 14 servos, 6 entradas analógicas y la función que permite la implementación de una fuente externa.

En tercer lugar, se encuentra el uso de motores MG996R y SG90 que su función es mover las falanges a través de poleas. Los servomotores MG996R posee un torque que oscila entre los 9.4 Kg/cm y los 11 Kg/cm a un ángulo de 180° de rotación, por otro lado, el servo SG90 cuenta con un torque 1.2 Kg/cm y 180° de rotación.

En la tabla 1.1, se presenta la comparación de las principales características de los servomotores implementados en este proyecto.

Tabla 1.1. Comparativa Servomotores

Servo motor	MG996R	SG90
Voltaje de operación	4.8 V a 7.2 V	3.0V a 7.2V
Torque	9.4 kg/cm (4.8 V) 11 kgf·cm (6 V)	1.8 Kg/cm (4.8 V)
Ángulo de rotación	180°	180°
Velocidad de operación	0.17 s/60° (4.8 V)	0.10 s/60° (4.8 V)

Fuente: Creado por el alumno

CAPÍTULO 2: CONSTRUCCIÓN DE LA PRÓTESIS

2. CONSTRUCCIÓN DE LA PRÓTESIS:

A continuación, se exponen los elementos esenciales en la manufactura del trabajo de título, la prótesis electromecánica. Este proceso se compone a través de distintas fases y componentes de gran importancia que se deben realizar de forma cronológica para llegar al producto final. En primer lugar, se realiza el diseño; en segundo lugar, la impresión en 3D; en tercer lugar, se comienza el armado del brazo; en cuarto lugar se implementa el microcontrolador a cargo de las funciones del brazo; y por último, se lleva a cabo la unión del brazo con el microcontrolador y posteriormente las pruebas pertinentes de las distintas funciones dispuestas a cumplir.

2.1. DISEÑO

La idea de una prótesis con el diseño de una mano humana viene de la intención de ayudar a la asimilación tanto personal como del exterior de una extremidad como la que sería del común de la población dando a lugar a un sentimiento de pertenencia.

De forma preliminar se investiga la disposición más adecuada de los componentes en busca de cumplir con la idea de un fácil transporte y una solidez que entregue seguridad al momento de uso.

La composición de una mano se puede observar en la figura 2.1, que consta de 3 partes en la cual se encuentra el metacarpo, más conocido como palma central, que a su vez conecta 5 dedos por un extremo superior, por el lado inferior se une con el antebrazo a través del carpo (muñeca). El diseño impreso en 3D consta de una palma, falanges proximales, falanges medias y falanges distales, en la sección del antebrazo se dispone con un interior hueco en el que se disponen los servomotores encargados del movimiento de 4 de las 5 falanges, que unidos a través

de una palma con el antebrazo, simula la composición común de una extremidad superior. Siendo un servomotor ubicado al interior de la palma encargado del movimiento del dedo pulgar, cabe mencionar que para la composición de la prótesis no se incluye la muñeca, ya que el movimiento rotativo no está contemplado en la prótesis.

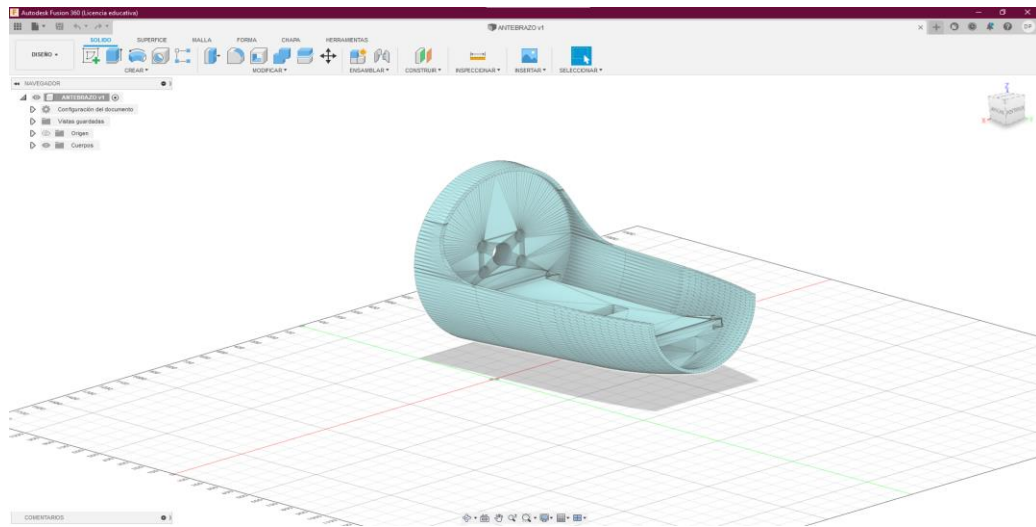
El diseño es realizado gracias a la aplicación de un programa que se llama Fusion 360, *“Fusion 360° es un software CAD, CAM y de circuitos impresos de modelado 3D basado en la nube para el diseño y la manufactura de productos. Diseña y proyecta productos para garantizar su ajuste, estética, forma y función.”* (Autodesk, 2016).

En la figura 2.2 presenta el diseño del antebrazo a través de la plataforma, también se puede observar en las figuras 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 algunos diseños de las partes de las prótesis electromecánicas, que a través del programa Fusion 360°, se puede moldear para su posterior impresión.



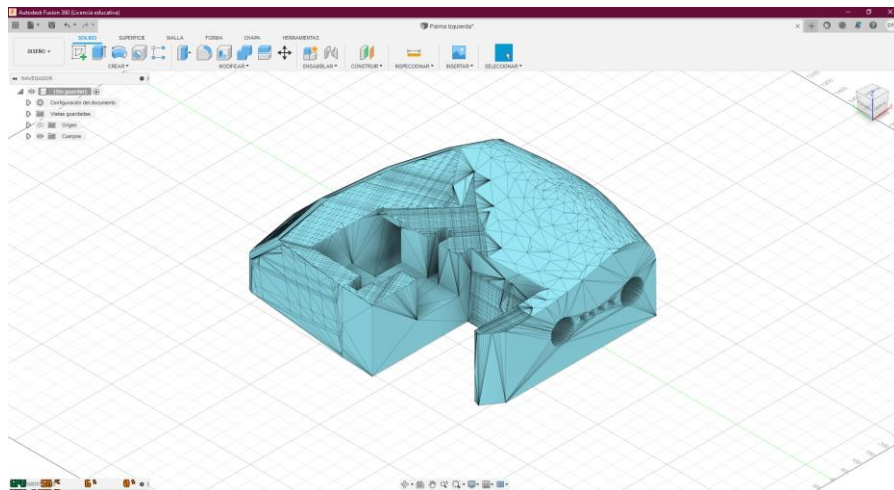
Fuente: (Braga, Morales, Olmos, & Valenzuela, 2009)

Figura 2.1 Huesos de la mano



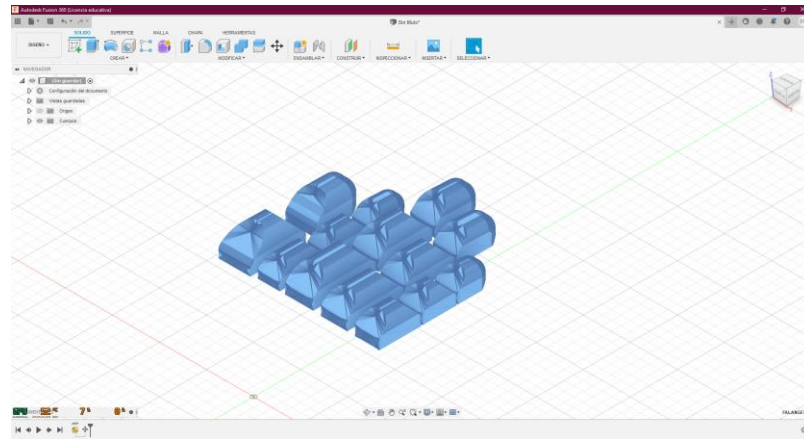
Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.2 Diseño de antebrazo Fusion 360



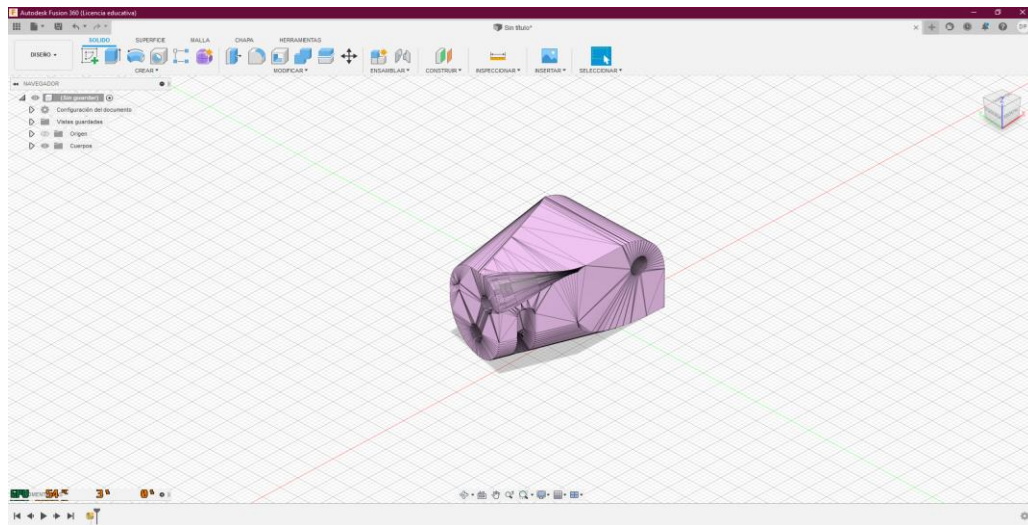
Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.3 Diseño de palma Fusion 360



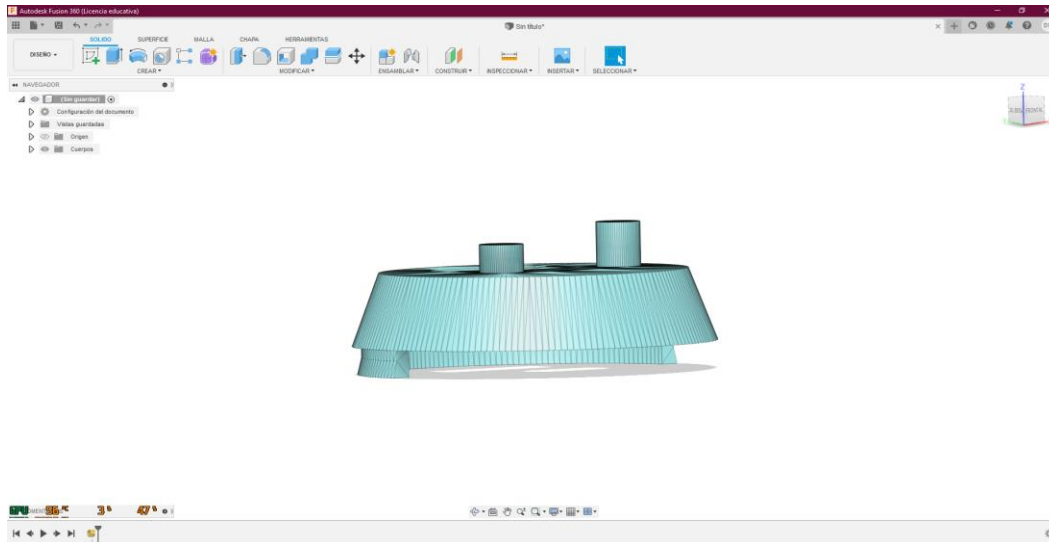
Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.4 Diseño de falanges Fusion 360



Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.5 Diseño base de pulgar Fusion 360



Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.6 Diseño base de palma Fusion 360

2.1.1. Impresión

La impresión 3D es una parte fundamental de este trabajo de título, ya que representa el mayor porcentaje de la estructura del proyecto, gracias a la utilización de filamento PLA, *“El ácido poliláctico es un polímero biodegradable que puede producirse a partir del ácido láctico, que puede fermentarse a partir de cultivos como el maíz.”* (tresdpro, 2019).

La impresora 3D funciona mediante coordenadas que se presenta mediante archivos STL donde la figura 2.8 se muestra, mientras se presenta el archivo STL en el slicer “Ultimaker Cura”, programa encargado de procesar la figura 3D, define especificaciones de temperatura, densidad de material y velocidad de trabajo demostrado en la figura 2.8. Se considera que la óptima forma de impresión es con una densidad del 30% a una temperatura de 175° y a una velocidad 50 mm/seg, lo que logra una solidez que entrega seguridad al momento de uso y mantiene un coste bajo de producción. Todo esto en un archivo g-code que la impresora es capaz de leer y ejecutar. *“G-Code es un lenguaje de programación de máquinas CNC y sus distintas*

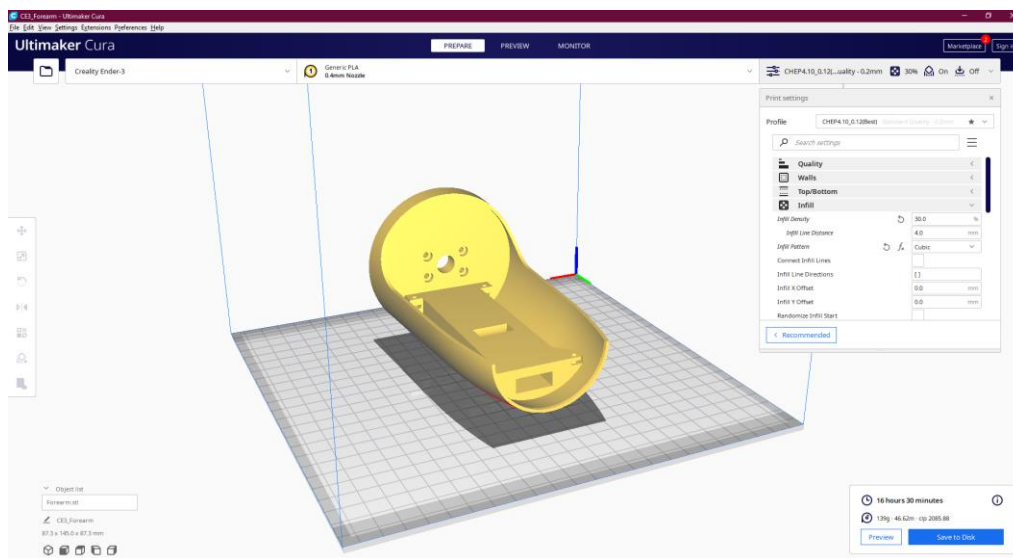
implementaciones están pensadas para controlar distintos tipos de máquinas, por lo cual contienen un conjunto de instrucciones muy amplio para poder controlar a todas ellas” (Llamas, 2019). Para mejor entendimiento en el proceso de fabricación, en la figura 2.7 se construye un diagrama de bloques



Fuente: Creado por el alumno

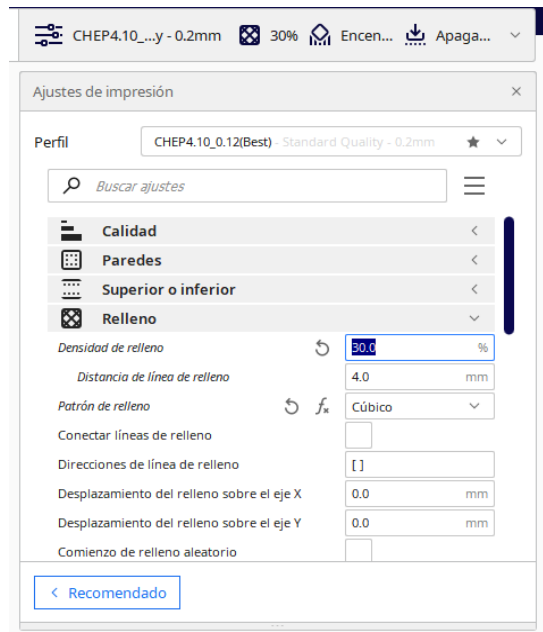
Figura 2.7 Proceso de modelado e impresión 3D

La impresora 3D que se utiliza en este proyecto corresponde a una Ender 3 de la marca Creality como se observa en la figura 2.9, la cual es capaz de imprimir en dimensiones 220 x 220 x 250 mm



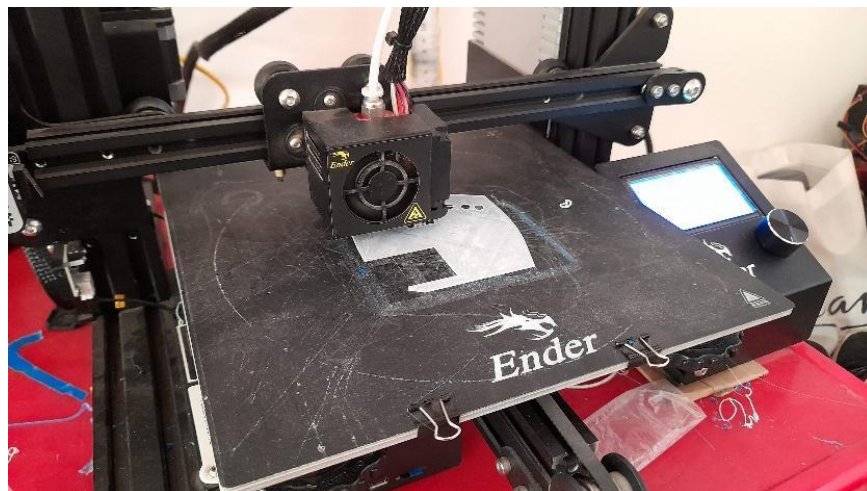
Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.8 Antebrazo Slicer Ultimaker Cura



Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.9 Relleno Antebrazo Slicer Ultimaker Cura

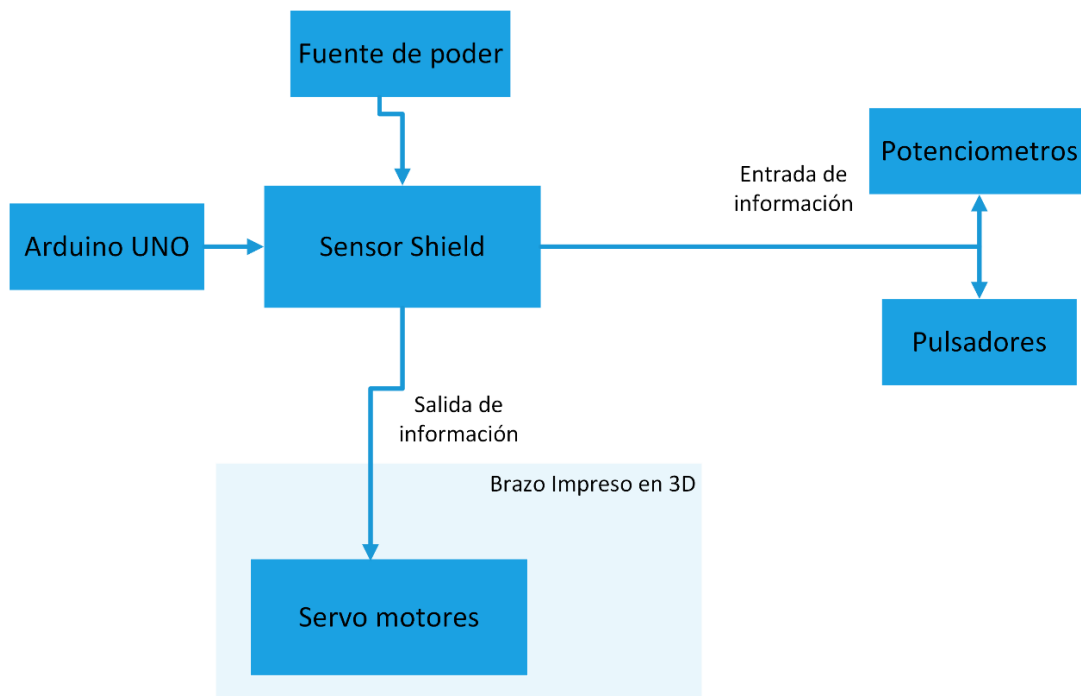


Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.10 Impresión de palma en 3D

2.2. CONTROL

Adentrado en la electrónica se presentan los componentes que se encargan de controlar las funciones que cumple la prótesis electromecánica, siendo parte principal del funcionamiento del sistema implementado. A continuación, se revelan sus partes.



Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.11 Diagrama de bloque del sistema

2.2.1. Microcontrolador

El microcontrolador es fundamental en la memoria debido al papel que cumple con la mediación entre las instrucciones que se dan y la prótesis, traduciendo directrices en forma de código de programación a coordenadas de movimiento, además, entrega lecturas de los movimientos y eventualmente la implementación de otros tipos de entrada de información.

2.2.1.1. Arduino

El microcontrolador que se utiliza en este proyecto corresponde al integrado ATmega328, de la tarjeta de desarrollo “Arduino UNO” como se muestra en la figura 2.10. Dentro de la gran gama de microcontroladores que existen en el mercado, se opta por la utilización de productos de este ecosistema, debido a su fácil accesibilidad, bajo costo y sobre todo su simpleza de funcionamiento, al contrario de como lo serían otros productos como un raspberry pi, el cual a pesar de tener muchas más funciones no serían de provecho para este proyecto.

El Arduino UNO funciona como una serie de circuitos integrados, los que gracias a una plataforma llamada IDE, es decir, una aplicación con herramientas para facilitar desarrollo de software, ayudan a introducir el código que interactúa con los circuitos de la placa.

En la interfaz de entrada del microcontrolador, en la cual se puede conectar distintos tipos de periféricos que poseen información que se traslada al microcontrolador quien será el encargado de procesar los datos, estos datos se pueden presentar en forma entrada de información como lo son sensores y como salida de información que se ejemplificado en la acción realizada por actuadores.

El lenguaje de código utilizado para su programación es una combinación de lenguaje C y lenguaje C++. Esta tarjeta estará encargada de controlar todo lo referente a la entrada de información por parte de los potenciómetros y pulsadores y al control del sistema de movimiento de la prótesis electromecánica.



Fuente: Arduino, 2005

Figura 2.12 Placa Arduino UNO



Fuente: webtecnologia, 2010

Figura 2.13 Diagrama de pines digitales y analógicos de Arduino UNO

2.2.2. Sensor Shield

Una característica importante es la utilización de una cantidad considerable de servomotores (se utilizan 5 específicamente), cantidad que es significativamente difícil de manejar debido al poco amperaje que entrega el microcontrolador por sí mismo, la función del "Shield" es desempeñar el papel de placa auxiliar ampliando las capacidades de la placa base Arduino, por ende, es una placa que se monta en una Arduino y no requiere de otras conexiones externas, que están conectadas a sus pines que a través de ellos pasa la información que será procesada por microcontrolador (Arduino) .

El sensor Shield que se muestra en la figura 2.11 dentro de sus pines auxiliares cuenta con una entrada para fuente externa de alimentación lo que junto a una entrada de energía apropiada proporciona la potencia necesaria para el correcto desempeño de los servomotores.



Fuente: altronics, 2010

Figura 2.14 Placa Sensor Shield

2.2.3. Código

Para la performance del proyecto se ocupa una serie de movimientos de demostración codificados en lenguaje C, el cual es utilizado en la plataforma de Arduino, a continuación, en la tabla 2.1 se muestra los pines asociados a cada servo. Se presenta el código diseñado para la mano electromecánica que realiza diversos movimientos. El código se encuentra en el anexo.

La programación del código está pensada para demostrar diferentes formas de accionar el movimiento de la prótesis, siendo uno de estos el movimiento de los dedos a partir de potenciómetros, conectados a las entradas analógicas del Arduino definiendo el ángulo de inclinación de la falange a partir del estado del potenciómetro.

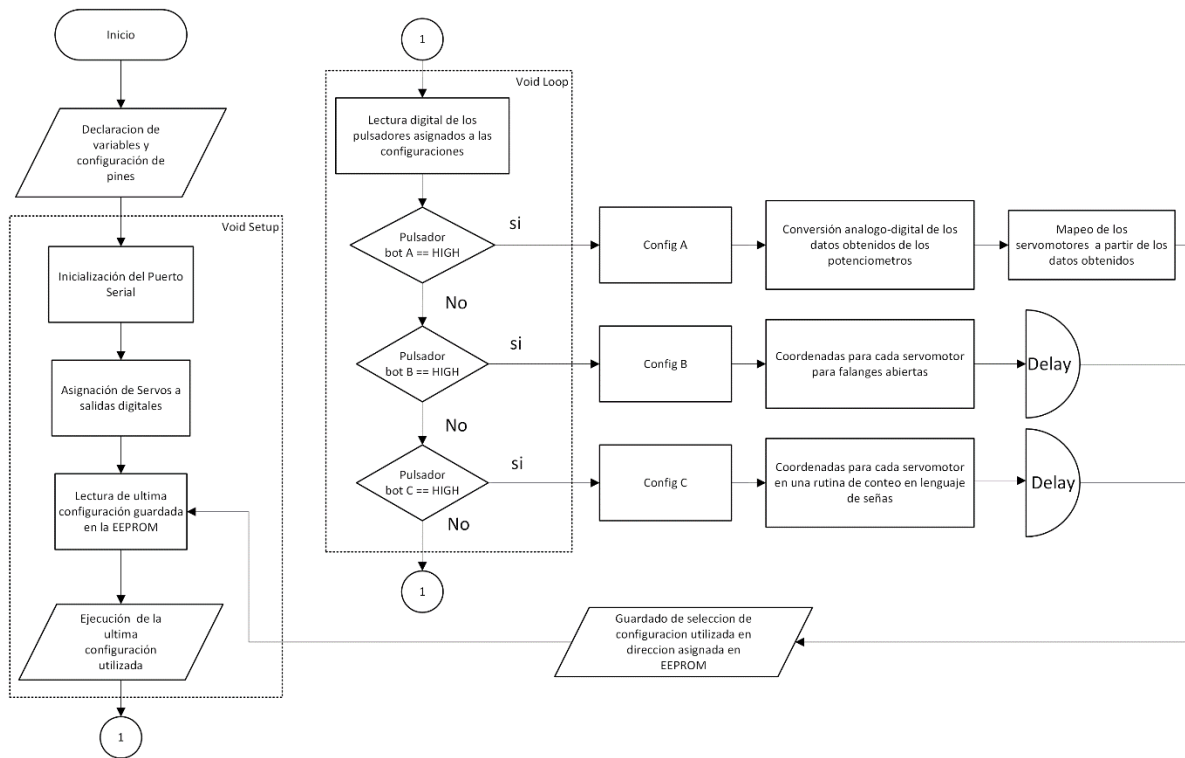
El segundo movimiento corresponde a una secuencia de conteo realizada por los dedos que en manera secuencial y repetitiva cuenta del 1 al 5. Estos distintos tipos de movimientos se realizan una vez es presionado un pulsador asignado a la configuración de cada uno de los movimientos

Tabla 2.1. Organización de motores por pin

Servo	Pin Arduino Uno	Función
Servo1	4	Palma (Base de pulgar)
Servo2	5	Dedo Pulgar
Servo3	6	Dedo Índice
Servo4	7	Dedo Medio
Servo5	8	Dedos Anular y Meñique

Fuente: Creado por el alumno

En el siguiente diagrama de flujo, se explica la función del código, graficando la secuencia lógica de cómo se interpreta el código a través del Arduino UNO hacia los servomotores.



Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.15 Diagrama de flujo de la función del código

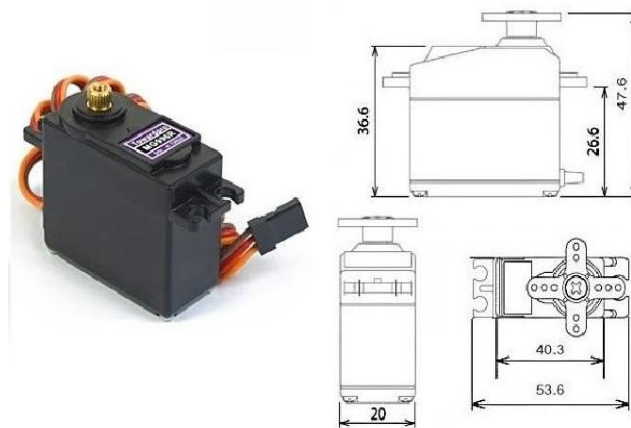
2.3. MOTORES

La función del movimiento del brazo está a cargo de los servomotores MG996R presentados en la figura 2.12, que asemejan los músculos que se ubican en el interior del antebrazo impreso anteriormente.

Un servomotor es un dispositivo independiente que hace la función de rotar en su eje con precisión y fluidez, ayudando para el movimiento de las poleas mostradas en la figura 2.13, los cuales corresponden a discos metálicos de 25 dientes ubicados en el extremo del eje encargados de tensar la cuerda de pescar amarrada a la punta de las falanges.

El motor se controla mediante pulsos eléctricos de ancho variable, PWM, a través del cable encargado de traspasar la información, “cable data”, también se encuentra el cable encargado de recibir la energía para accionar el torque del motor, “cable voltaje”, y por último el cable que conforma el circuito cerrado para el circuito, “cable GND”.

El voltaje de operación del servomotor es de 4.8v a 6v y con un torque 13kg/cm a 15 kg/cm, cuenta con un grado de rotación de 120°, con 60° de rotación por cada lado a partir del punto medio.



Fuente: alldatasheet, 2018

Figura 2.16 Servo motor MG996R



Fuente: altronics, 2010

Figura 2.17 Disco 25 dientes

Para la flexión del pulgar en la sección de la palma se hace uso de un servomotor SG90 que se muestra en la figura 2.14 y al igual que el servomotor MG996R se controla a través de PWM y funge la función de la traslación del pulgar hacia el interior de la palma, este movimiento proporciona una ayuda sustancial a la acción de agarre de la prótesis.



Fuente: altronics, 2010

Figura 2.18 Servomotor SG90

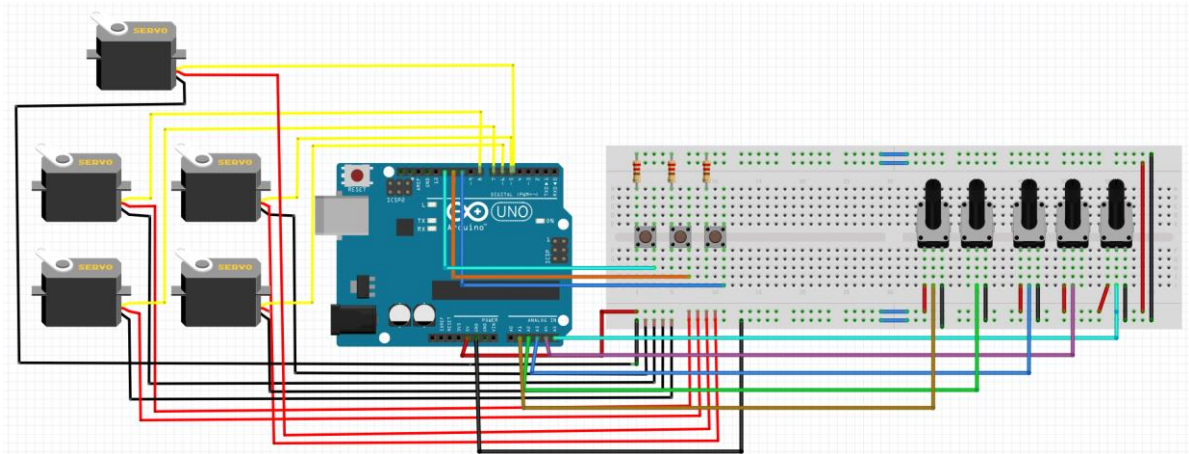
2.4. IMPLEMENTACIÓN

Para finalizar se tienen que implementar todos los componentes expuestos con anterioridad, para ello se empieza desde la unión de las partes impresas, lo que para ello se utiliza un elástico en la sección posterior de las falanges, que amarradas desde la parte superior posterior de la palma se mantienen erguidas y juntas, y por su parte interior se conduce el hilo de pescar encargado de direccionar las falanges hacia el interior de la palma cuando se accionan los servomotores. Para el antebrazo con el uso de pegamento se sujeta la base que se encuentra atornillados los servomotores, y de la misma forma se une la base de la palma.

En segundo lugar, se implementan poleas en el brazo encargado del torque del servomotor que gracias a guías impresas en 3D se encargan de sujetar el hilo de pescar unido a las falanges.

En tercer lugar, se une la culminación de la prótesis con el microcontrolador por medio del sensor Shield conectando los pines, data, voltaje y gnd de los 5 motores a la placa. Posteriormente se sube el código al Arduino uno para que cumpla su funcionamiento.

Para la implementación de los motores se hace uso de una fuente externa, ya que a pesar de que la placa es capaz de alimentar los servomotores no cuenta con la potencia suficiente para que funcionen correctamente. La fuente que se utiliza es una fuente regulable externa de 60W de potencia, de la cual se extrae 5V a 5A, potencia necesaria para el manejo de los servomotores.



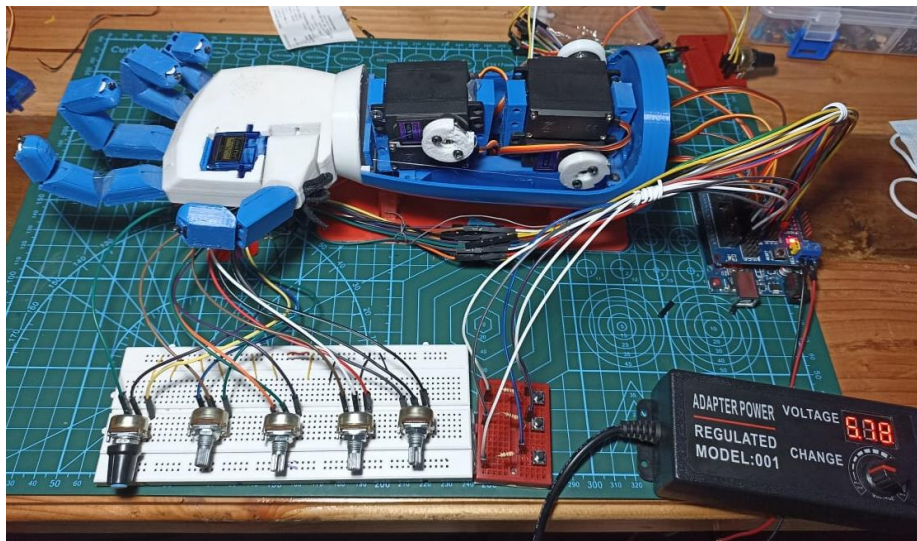
Fuente: Creado por el alumno

Figura 2.19 Diagrama de conexión de la prótesis

CAPÍTULO 3: PRUEBAS Y RESULTADOS

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Al momento de tener en este proyecto la parte de implementación ya realizada, como se muestra en la figura 3.1, se procede a la ejecución de las pruebas de rendimiento para la prótesis, en las cuales se contempla grados de movimiento, alimentación de la prótesis, secuencias de movimiento autónomo, movimiento a través de entradas y, por último, la realización de un código que incluye las distintas configuraciones que se llevaron a prueba anteriormente.



Fuente: Creado por el alumno

Figura 3.1 Brazo completamente implementado

3.1. PRUEBA DE ALIMENTACIÓN DEL BRAZO

La primera prueba a realizar en este trabajo de título consiste en la comprobación del movimiento del brazo, éste es realizado gracias a la alimentación de los actuadores a través de la

fuelle de poder, se considera como base las especificaciones de la ficha técnica de los servomotores, especificaciones encontradas en la tabla 1.1 del capítulo 1, por lo que se estima que la fuente de poder debe de ser como mínimo de 5 V. Sin embargo, se tiene en cuenta que la cantidad de servomotores implementados genera una considerable carga que supera la intensidad máxima que puede entregar el Arduino, esto se comprueba al momento de la primera implementación que se define únicamente conectando los servomotores al microcontrolador a través del sensor Shield, sin el uso de una fuente externa, evidenciando la incapacidad del Arduino al superar la carga máxima que no alcanza para mover todos los servomotores en conjunto. Se procede a calcular la corriente que consume el circuito completo como se muestra en la ecuación 3.1

$$I_{Total} = I_{Arduino} + \sum_{Servo=1}^5 I_{Servo}$$

Ecuación 3.1 Formula para el cálculo de Intensidad total

La fuente de poder externa que se usa para realizar las pruebas provee de la intensidad suficiente para mover en su totalidad. Las especificaciones de la fuente de poder se encuentran en el etiquetado del instrumento expuestos en la figura 3.2.

Especificaciones técnicas	
Voltaje de entrada	240 V
Voltaje de salida	3/12 V
Carga de corriente máxima	5 Amp
Frecuencia	60 Hz

Fuente: Creado por el alumno

Figura 3.2 Especificaciones de la fuente de poder

3.1.1. Movimiento de prueba autónomo

Una vez encontrada la potencia necesaria para poder llevar a cabo el proyecto se procede a desarrollar un código en el cual se busca probar el grado de movimiento de los 5 servomotores.

En primera instancia, al desarrollar el código se parte por integrar los servomotores, después a cada uno se le asigna un pin del Arduino UNO a través del sensor Shield definido como salida de información, y, para terminar, al código se le asigna 2 grados de movimiento, uno siendo su posición inicial, y el otro el fin del recorrido, al cual debe llegar al finalizar la transición. Esta serie de movimientos se replica de forma secuencial comenzando por el servomotor asignado a la base del pulgar para seguir con el pulgar, seguido por el dedo índice, dedo medio y por último el servomotor asignado al anular y meñique. Para todos los motores los ángulos de movimiento son de 0° para la posición inicial y 120° para la posición final a excepción del servomotor SG90 que corresponde a la base del pulgar el cual es de 90° para su posición final. En la tabla 3.1 a continuación se ejemplifica los grados alcanzados en cada falange dependiendo de la corriente aplicada.

Tabla 3.1 Grados de movimiento por Intensidad de corriente

Corriente (Amp)	Base de pulgar	Pulgar	Indice	Medio	Anular y meñique
2	0° a 90°	0° a 120°	0° a 40°	0°	0°
13	0° a 90°	0° a 120°	0° a 120°	0° a 120°	0° a 120°

Fuente: Creado por el alumno

3.1.2. Movimiento de prueba con botones

Para la siguiente prueba se desarrolla un código que es capaz de recibir entrada de información en forma de pulsadores, cada servomotor tiene asignado dos pulsadores, uno designado para rotar el servo desde su punto de inicio hasta el punto final, y el otro pulsador se encarga de devolverse desde su punto final a su estado inicial

Adentrado en el código de esta prueba a diferencia de anterior código, además de integrar cada servomotor de la prótesis, se debe integrar los dos pulsadores asignados a cada actuador, y a su vez estos pulsadores se les define como entrada de información, también se integra al código el ángulo inicial de cada servo y el estado del servomotor, el cual corresponde a la posición actual del actuador y del pulsador. El estado del servomotor considera cuando el servomotor se encuentra en una posición x y el estado del pulsador asignado a un determinado movimiento, izquierda o derecha, permitiendo que, si el servomotor no ha llegado a su posición final éste sea capaz de moverse mientras que el pulsador se mantenga presionado, es decir, el pulsador está encargado de pasar de su estado inicial en el momento actual a su posición final y el otro pulsador cumple la misma función, pero en sentido inverso.

3.1.3. Movimientos de prueba mixto

Con los 2 códigos anteriormente implementados, se realiza una última prueba incluyendo en un mismo código, todo lo expuesto en las anteriores pruebas, este código contiene en su configuración 3 modos de funcionamiento. Comenzando con la primera configuración, que consiste en la demostración de un movimiento simple reflejado en la flexión y extensión de cada falange en forma secuencial y repetitiva. En la segunda configuración, se ejecuta la función de movimiento de la prótesis a partir de pulsadores para definir la posición de cada servomotor. En tercer lugar, se ejecuta una rutina de conteo, que al igual que la primera configuración cada movimiento es de forma autónoma.

Para aplicar cada configuración que se desarrolló en el código de forma tal que cada una de estas configuraciones corra a partir de apretar botón siendo estos 3 pulsadores distintos, uno para cada tipo de movimiento.

```
Codigo_Movimientos_Protesis §
53
54 void configuno() {
55
56     if (millis() - tiempo > 10) {
57         tiempo = millis ();
58
59         val1 = analogRead(pot1);
60         val1 = map(val1, 0, 1023, 0, 90);
61         servol.write(val1);
62
63         val2 = analogRead(pot2);
64         val2 = map(val2, 0, 1023, 0, 180);
65         servo2.write(val2);
66
67         val3 = analogRead(pot3);
68         val3 = map(val3, 0, 1023, 0, 180);
69         servo3.write(val3);
70
71         val4 = analogRead(pot4);
72         val4 = map(val4, 0, 1023, 0, 180);
73         servo4.write(val4);
74
75         val5 = analogRead(pot5);
76         val5 = map(val5, 0, 1023, 180, 0);
77         servo5.write(val5);
78     }
79 }
80
```

Fuente: Creado por el alumno

Figura 3.3 Extracto del código que muestra la configuración de movimiento a partir de potenciómetros

3.2. RESULTADOS

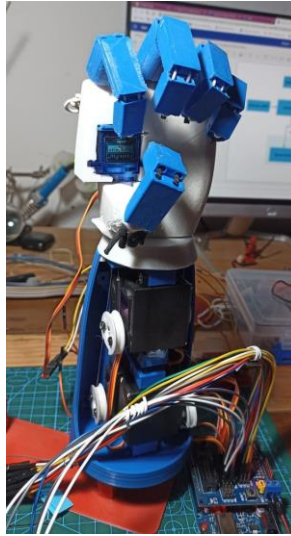
Durante el proceso de fabricación, implantación y de prueba, se evalúa cada proceso de forma individual, primeramente, se tiene en cuenta los posibles resultados que se espera llegar con la realización de este trabajo de título, para posteriormente, compararlos con los resultados obtenidos. Además, se deja registro de cada dificultad encontrada en cada una de las etapas.

3.2.1. Resultados esperados

Al momento de realizado el proyecto, se tiene la expectativa de obtener, una prótesis impresa en 3D, que sea económica de fabricar, con un diseño amigable para la vista del ser humano y que realice un movimiento electromecánico, gracias a la implementación de servomotores DC, controlados a través del integrado ATmega 328P, este movimiento debe tener las características de ser fluido, entregar una consistente firmeza al momento de estar en una determinada posición, y además, que la implementación de la prótesis sea compacta, ya que el desarrollo está pensando en el transporte de la prótesis al momento de su uso. También se espera que la prótesis sea impulsada gracias a una fuente de poder a partir de baterías de 5V.

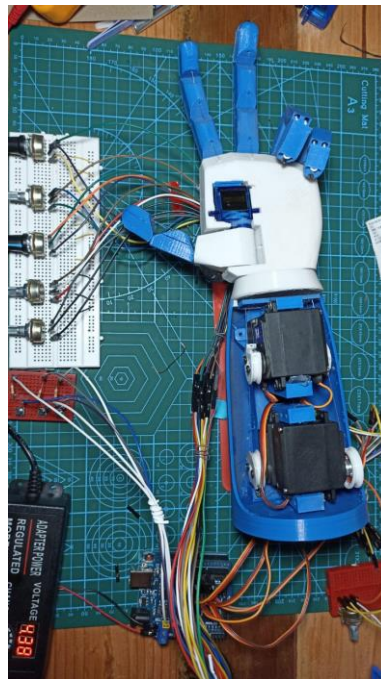
3.2.2. Resultados obtenidos

El desarrollo del proyecto culminó con la implementación de una prótesis impresa en 3D, impulsada por 4 servomotores MG996R para el movimiento de los falanges y un servomotor SG90 para el movimiento de la base del pulgar, esta prótesis realiza su movimiento determinado por el integrado ATmega 328P de la placa de desarrollo Arduino UNO, los servomotores conectados a la placa, lo son a través de la placa auxiliar sensor Shield, toda la implementación es alimentada gracias a una fuente de poder que entrega 5V a 5A. Los movimientos de los servomotores varían entre un movimiento autónomo realizando una secuencia escrita en el Arduino y otros movimientos se realizan por la acción de potenciómetros para determinar su posición.



Fuente: Creado por el alumno

Figura 3.4 Prótesis realizando un puño



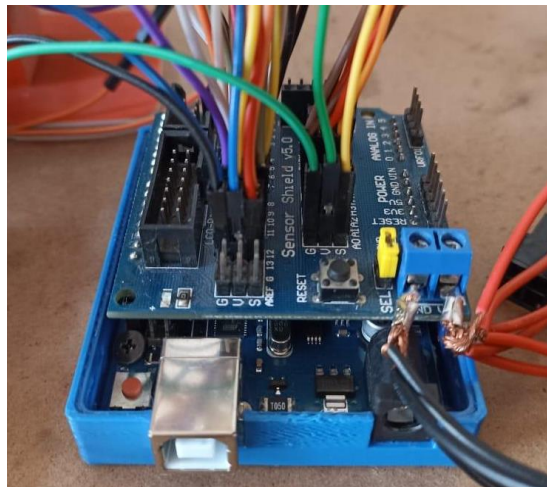
Fuente: Creado por el alumno

Figura 3.5 Prótesis contando hasta 3

3.2.3. Dificultades encontradas y soluciones aplicadas

El proceso de desarrollo de la prótesis obtuvo mayormente los resultados esperados con anterioridad, con la excepción de algunos parámetros que serán descritos a continuación, pero aun así consiguiendo de todas maneras cumplir con requerimientos necesarios para el funcionamiento de la prótesis electromecánica.

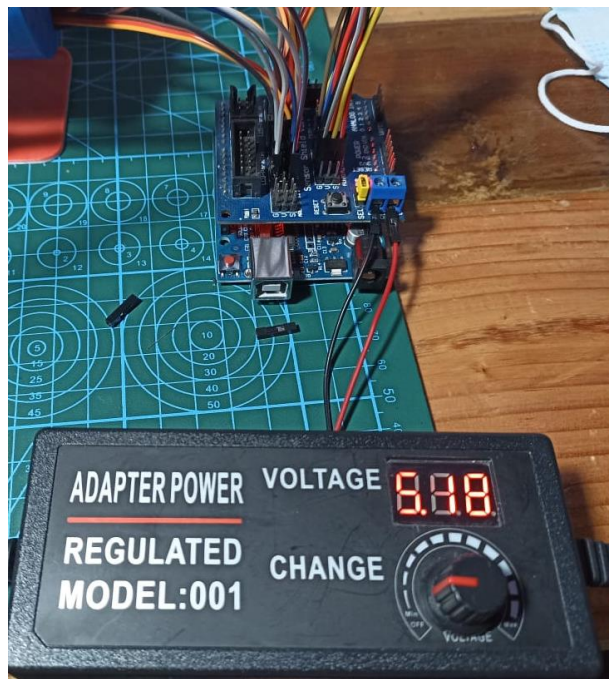
La implementación al momento de conectar la cantidad de servos que se tiene a la placa Arduino UNO no es capaz de controlar de forma eficiente los 5 servomotores implementados, ya que, a pesar de entregar el voltaje necesario para el funcionamiento de los motores, no entrega la corriente para sostener la carga que entregan los servos, además de contar con la distribución adecuada de pines para su implementación, por lo que se explora la opción de ocupar una placa auxiliar para suplir y corregir su déficit. Para la solución de este problema se implementa el uso del sensor Shield, el cual es explicado de forma más extensa en los anteriores capítulos. La implementación del Arduino UNO con el sensor Shield se muestra en la figura 3.3



Fuente: Creado por el alumno

Figura 3.6 Placa Arduino UNO con sensor Shield

La alimentación de la prótesis fue otra de las dificultades encontradas al momento del desarrollo del proyecto, ya que la cantidad de carga que genera el uso de 5 servomotores no está considerada en el momento de la primera implementación, por lo que se un rendimiento deficiente al momento de mover los servos, con movimientos erráticos incapaces de completarse, incluso movimientos no realizados, este problema provenía de la baja intensidad de corriente que entrega el Arduino UNO por sí solo, por lo que al momento de implementar el sensor Shield se encuentra la posibilidad de adicionar una fuente externa que alimenta tanto a la placa de desarrollo como a los actuadores. Para solucionar la falta de corriente se hace uso de una fuente de poder de 5V de hasta 5A.



Fuente: Creado por el alumno

Figura 3.7 Arduino con sensor Shield junto a la fuente de poder externa

3.3. POSIBLES MEJORAS

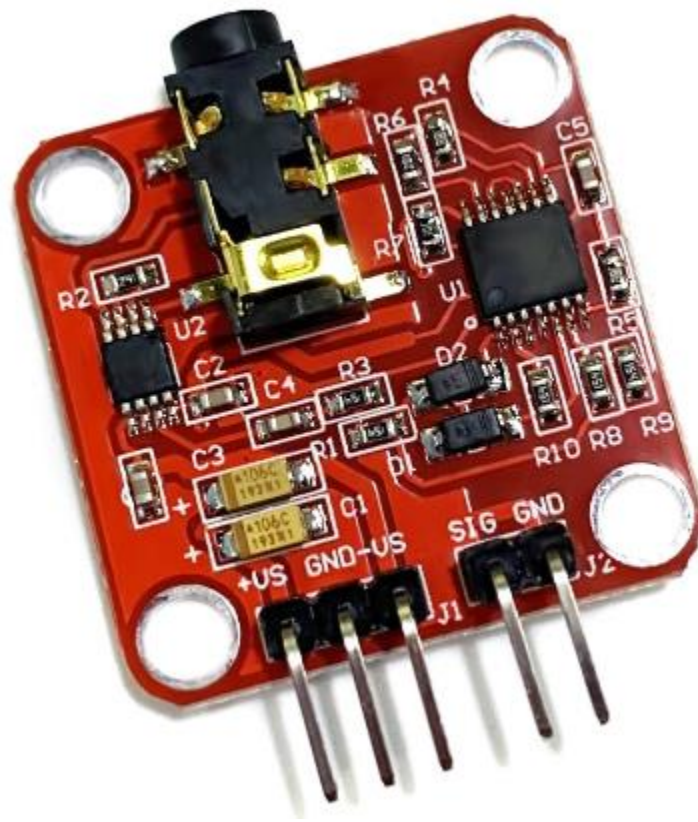
Para este trabajo de título se considera la posibilidad de la implementación de un sensor EMG, que no es parte del proyecto como tal. Sin embargo, es una idea complementaria para una posible mejora en este proyecto.

El sensor EMG, corresponde a un sensor que recibe las señales bioeléctricas del cuerpo humano expuesto en la figura 3.4, este sensor cuenta con 3 electrodos, estos electrodos van conectados a la persona, la que a través de los pulsos que entrega el movimiento muscular, se transmite por los electrodos médicos hacia el sensor. La amplitud que genera la señal transmitida por el músculo tiende a ser muy baja.

“La señal generada por una gran unidad motora tiene una amplitud de 0 volt (en reposo, es decir, cuando no existe contracción muscular) y 250 μ V durante la contracción. Debido a que las señales bioeléctricas son de bajo valor, ruidos o artefactos como el ruido ambiente o en mayor medida el ruido de línea (50Hz – 60Hz) pueden provocar una falsa interpretación de los resultados.” (Meneses, 2005)

Para solucionar este problema de baja amplitud se hace una etapa de preamplificación, la cual consiste en detectar y amplificar las señales electromiograficas y además descartar los ruidos. Una vez preamplificada la señal es filtrada para posteriormente poder ser analizada por el controlador, teniendo las 2 etapas anteriores listas la señal pasa a ser amplificada una segunda vez para tener una etapa final la conversión análogo-digital, encargada a un módulo conversor, el cual su función corresponde a convertir la señal analógica (voltaje obtenido del movimiento muscular del brazo) a señal digital (lenguaje binario), señal que es capaz de interpretar el controlador del Arduino UNO.

Otra solución que sería prudente agregar es la alimentación propia del proyecto completo, el cual es necesario como mínimo suministrar 5V, pero siendo la dificultad principal el entregarle la corriente suficiente para alimentar todos los componentes involucrados sin perder su tamaño y la posibilidad de transporte, para esto se sugiere la puesta en marcha de la prótesis electromecánica el uso de baterías de litio con potencia suficiente para mover el brazo en su totalidad.



Fuente: Creado por el alumno

Figura 3.8 Sensor EMG

3.4. COSTOS

El desarrollo y obtención de los todos los componentes serán expuestos en diferentes tablas que tratan de señalar de forma ordenada los costos para la fabricación de la prótesis electromecánica, a excepción de algunos elementos, ya que se tenían de antemano por lo que sería difícil el costo final de aquellos productos, como lo son la fuente de poder y la impresora.

En la Tabla 3.2 se muestran los elementos que se tuvieron que imprimir a través de la impresión 3D, cabe destacar que la maquinaria no se tuvo que comprar, ya que se posee con anterioridad. Los componentes que son impresos tienen un costo variable, debido a que depende de distintos factores como el tiempo, material, electricidad y peso de la impresión que incluye la densidad de relleno y las dimensiones de la pieza, a continuación, se presenta de forma ordenada cada uno de estos componentes y el monto final.

Tabla 3.2 Costos de impresión

Parte impresa	Peso (gr)	Costo Filamento (CLP/Kg)	Tiempo de impresión (Horas)	Tarifa de luz (CLP/kW)	Costo de impresión
Falanges	30	\$15.000	4	\$78,79	\$3.869
Palma	44	\$15.000	5.25	\$78,79	\$5.248
Antebrazo	106	\$15.000	12	\$78,79	\$12.060
Base servos	27	\$15.000	3.9	\$78,79	\$3.684
Poleas para Servo	8	\$15.000	1	\$78,79	\$1.089
Tiempo Impresión			26.15 Hrs	Costo Total	\$25.950
				UF	0.76 UF

En siguiente tabla 3.3, se pueden observar los elementos comprados a través de diferentes fuentes, algunos siendo conseguidos en el comercio extranjero, debido al bajo costo a comparación del comercio nacional, todo esto en favor de conseguir el menor costo posible para la creación de la prótesis.

Tabla 3.3 Costos de compra de productos

Componente	Costo de producto unitario	Costo de envió	Costo final
Servo MG996R	\$6290	\$0	\$23160
Servo SG90	\$3000	\$0	\$3000
Sensor Shield	\$992	\$1080	\$2072
Arduino UNO	\$9990	\$0	\$9990
Disco 25 Dientes	\$979	\$7022	\$8001
Costo total			\$46.223
UF			1.36 UF

Fuente: Creado por el alumno

Como se expone en la tabla 3.4 el costo de tanto la manufactura de la prótesis como de los productos adquiridos a través de distintos comercios, siempre buscando la opción más económica sin sacrificar la calidad final, da como total de costos la cantidad de \$212.183 pesos o 6.24 UF.

Tabla 3.4 Costos Totales

	Costo
Impresión	\$25.950
Compras de productos	\$46.233
Mano de obra	\$140.000
Costo total	\$212.183
UF	6.24 UF

Fuente: Creado por el alumno

CONCLUSIÓN

Para concluir este trabajo de título se deja en evidencia la creación de una prótesis de bajo costo, en el cual gran parte de ello se pudo concretar, como lo es el desarrollo a un bajo costo monetario, con todos los materiales ya previstos, que son los servomotores, potenciómetros y pulsadores, todos estos en su mayoría reciclables, también, ser capaz de realizar movimientos complejos y sincronizados. Es de suma importancia recalcar que la implementación de los componentes se tiene que realizar de forma cronológica y ordenada, ya que cada parte de proceso es una parte fundamental para la continuación de la siguiente etapa, por ejemplo, la impresión no puede realizarse sin haber antes concluido la etapa de diseño, el cual debe estar orientado a los componentes con los que se van a realizar el proyecto, ya que si bien no es necesario que sean los mismos modelos si debe ser la composición de estos materiales, sin escapar del objetivo principal que es mantener un bajo costo.

En la construcción de la prótesis electromecánica no se pudo cumplir con el objetivo de ser fácilmente transportable, ya que no se encontró una fuente de poder que sea capaz de transportarse de forma cómoda y que entregue una autonomía tal que no sea necesario estar conectado a una toma de corriente. Es importante destacar que una de las dificultades que más tiempo demoró solucionar e incluso hasta el momento final del proyecto presentó problemas con el modelo realizado fue el de encontrar la fuente de poder ideal, que cumpliera con los requisitos de ser fácilmente transportable.

Si bien los objetivos económicos fueron alcanzados, se debe indicar que fue en gran medida posible gracias a que tiene herramientas fundamentales al momento de desarrollar el proyecto, como lo sería la impresora 3D y la fuente de poder.

BIBLIOGRAFÍA

alldatasheet. (2018). *alldatasheet*. Obtenido de alldatasheet:

<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1131873/ETC2/MG996R.html>

altronics. (2010). *altronics*. Obtenido de altronics: <https://altronics.cl/sensor-shield-v50>

Arduino. (2005). *arduino.cl*. Obtenido de arduino.cl:

<https://arduino.cl/wp-content/uploads/2019/09/Arduino-Uno.jpg>

Autodesk. (2016). *Autodesk Latam*. Obtenido de

<https://latinoamerica.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

Braga, R., Morales, S., Olmos, C., & Valenzuela, A. (Sabado de Octubre de 2009).

Aplicaciones de

Tic. Obtenido de

http://aplicacionesdetic.blogspot.com/2009_10_01_archive.html

Llamas, L. (12 de diciembre de 2019). <https://www.luisllamas.es/>. Obtenido de

<https://www.luisllamas.es/>:

<https://www.luisllamas.es/que-es-el-g-code-y-su-importancia-en-la-impresion-3d/>

Nikkei. (14 de Octubre de 2015). *elcomercio.pe*. Obtenido de elcomercio.pe:

<https://elcomercio.pe/tecnologia/inventos/japoneses-crean-protesis-robotica-costo-229116noticia/>

Prensa y comunicaciones Ingeniería UC. (2016). FUTUROS INGENIEROS UC FABRICAN LA PRIMERA MANO ROBÓTICA IMPRESA EN 3D DEL PAÍS. *Prensa y comunicaciones Ingeniería UC*, 1.

tresdpro. (9 de septiembre de 2019). *tresdpro*. Obtenido de tresdpro:

<https://tresdpro.com/que-es-el-material-pla/>

Zeas, D. M., & Zuñiga Tenesaca, D. A. (2011). Diseño y construcción de una mano robótica para

La enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas. Cuenca, Ecuador.

Meneses, A. (2005). *www.decalme.com*. Obtenido de www.decalme.com:
<https://www.dalcame.com/emg.html#.YciJHWjMKUk>

GLOSARIO

Estereolitografía: Formato de transmisión de datos estándar por excelencia de la industria de creación rápida de prototipos.

Control numérico por computadora: Herramienta automática equipada con un sistema de control de programa, que puede lograr el propósito de procesamiento y producción de piezas.

Entorno de desarrollo integrado: sistema de software para el diseño de aplicaciones que combina herramientas comunes para desarrolladores en una sola interfaz de usuario gráfica.

Salida: Entrega una señal de control que le dará funcionalidad a un circuito electrónico que será el encargado de cumplir con las funciones que el usuario requiera.

Electromiografía: estudios de conducción nerviosa, son pruebas que miden la actividad eléctrica de los músculos y nervios.

Electroencefalografía: Registro de la actividad bioeléctrica cerebral en condiciones basales de reposo, en vigilia o sueño, y durante diversas activaciones.

Flexo-sensor: Sensor que registra qué tan flexible es un objeto.

Actuadores: Dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un movimiento.

Analógico: Sistema cuyos variables varían de una forma continua en el tiempo y pueden tomar valores infinitos.

G-Code: Lenguaje de programación.

Pines: Contacto eléctrico de un componente

Data: Enlace a datos de la transmisión de información.

Pulsador: Dispositivo que permite desviar o interrumpir el curso de una corriente eléctrica.

Entrada: Permite recibir señales de voltaje en el hardware.

Bioelectricidad: Electricidad generada por el cuerpo.

Electrodo Médico: Dispositivo con una placa metálica que conduce la electricidad desde un instrumento hasta una persona. Los electrodos también pueden llevar las señales eléctricas de los músculos, el cerebro, el corazón, la piel u otras partes del cuerpo hasta los aparatos de registro para ayudar a diagnosticar ciertas afecciones.

ANEXO

CÓDIGO: MOVIMIENTO DE PRUEBA AUTÓNOMO

```
#include <Servo.h>
```

```
#include <EEPROM.h>
```

```
Servo servo1; //palma
```

```
Servo servo2; //pulgar
```

```
Servo servo3; //indice
```

```
Servo servo4; //medio
```

```
Servo servo5; //meñique y anular
```

```
//declaración de variables
```

```
uint32_t tiempo; //integrado no asignado de 32 bit
```

```
int eeAddress; //dirección de guardado en EEPROM de la última posición
```

```
int ultimaconfig;
```

```
int botA = 11; //Botón para elegir la configuración A
```

```
int botB = 12; //Botón para elegir la configuración B
```

```
int botC = 10;    //Botón para elegir la configuración C

int configA = LOW;    //La configuración A permite mover el servo a través de
potenciómetros cada dedo tiene asignado 1 potenciómetro para abrir y cerrar (se define
en estado "bajo" por defecto)

int configB = LOW; //La configuración B permite mover el servo a traves de coordenadas
de posición abriendo (se defiende en estado "bajo" por defecto)

int configC = LOW; //La configuración C permite mover el servo a través de coordenadas
de posición realizando un conteo secuencial del 1 al 5 en loop (se define en estado "bajo"
por defecto)

int val_eeprom;    //valor final que se le asigna guardar en la EEPROM de los obtenidos
de la última configuración usada

//asignación de entrada analógica para potenciómetro.

int pot1 = A1;

int pot2 = A2;

int pot3 = A3;

int pot4 = A4;

int pot5 = A5;

//asignación de valores analógico-digital para conversión lineal

int val1;
```

```
int val2;
```

```
int val3;
```

```
int val4;
```

```
int val5;
```

```
void setup() {
```

```
  Serial.begin(9600); //inicializar puerto serial
```

```
  tiempo = millis();
```

```
  pinMode (botA, INPUT_PULLUP); //con input_pullup se define pulsador encargado de  
  seleccionar la config A como entrada en alto por defecto
```

```
  pinMode (botB, INPUT_PULLUP); //con input_pullup se define pulsador encargado de  
  seleccionar la config B como entrada en alto por defecto
```

```
  pinMode (botC, INPUT_PULLUP); //con input_pullup se define pulsador encargado de  
  seleccionar la config C como entrada en alto por defecto
```

```
  //asignación de salidas digitales PWM
```

```
  servo1.attach(4); //palma
```

```
  servo2.attach(5); //pulgar
```

```
  servo3.attach(6); //indice
```

```
  servo4.attach(7); //medio
```

```
  servo5.attach(8); //anular y meñique
```

```
//ejecución de la última configuración utilizada

val_eeeprom = EEPROM.read(eeAddress); //Lectura de dirección asignada para guardar
los datos en la EEPROM sobre la última configuración utilizada

Serial.print("valor en dirección : ");

Serial.print(eeAddress);

Serial.print(" ultima config: ");

ultimaconfig = val_eeeprom; //selección y ejecución de la última configuración
utilizada

}

void configuno() {

if (millis() - tiempo > 10) {

tiempo = millis ();

val1 = analogRead(pot1);

val1 = map(val1, 0, 1023, 0, 90); //asigna los valores del potenciómetro a valores
digitales equivalentes a los grados de inclinación del servo

servo1.write(val1);
```

```
val2 = analogRead(pot2);  
  
val2 = map(val2, 0, 1023, 0, 180);  
  
servo2.write(val2);
```

```
val3 = analogRead(pot3);  
  
val3 = map(val3, 0, 1023, 0, 180);  
  
servo3.write(val3);
```

```
val4 = analogRead(pot4);  
  
val4 = map(val4, 0, 1023, 0, 180);  
  
servo4.write(val4);
```

```
val5 = analogRead(pot5);  
  
val5 = map(val5, 0, 1023, 180, 0);  
  
servo5.write(val5);
```

```
}
```

```
}
```

```
void configdos() {  
  
  if (millis() - tiempo > 10) {  
  
    tiempo = millis ();
```

```
servo1.write(180);
```

```
delay(150);
```

```
servo2.write(180);
```

```
delay(150);
```

```
servo3.write(180);
```

```
delay(150);
```

```
servo4.write(180);
```

```
delay(150);
```

```
servo5.write(0);
```

```
delay(150);
```

```
}
```

```
}
```

```
void configtres() {
```

```
  if (millis() - tiempo > 10) {
```

```
    tiempo = millis ();
```

```
//1//
```

```
servo1.write(0); //palma
```

```
servo2.write(0); //pulgar
```

```
servo3.write(180); //indice
```

```
servo4.write(0); //medio
```

```
servo5.write(180); //meñique y anular
```

```
delay(3000);
```

```
//2//
```

```
servo1.write(0); //palma
```

```
servo2.write(0); //pulgar
```

```
servo3.write(180); //indice
```

```
servo4.write(180); //medio
```

```
servo5.write(180); //meñique y anular
```

```
delay(3000);
```

```
//3//
```

```
servo1.write(100); //palma
```

```
servo2.write(180); //pulgar
```

```
servo3.write(180); //indice
```

```
servo4.write(180); //medio  
servo5.write(180); //meñique y anular  
delay(3000);
```

```
//4//
```

```
servo1.write(0); //palma  
servo2.write(0); //pulgar  
servo3.write(180); //indice  
servo4.write(180); //medio  
servo5.write(0); //meñique y anular  
delay(3000);
```

```
//5//
```

```
servo1.write(100); //palma  
servo2.write(180); //pulgar  
servo3.write(180); //indice  
servo4.write(180); //medio  
servo5.write(0); //meñique y anular  
delay(3000);
```

```
}
```

```
}
```

```
void loop() {  
  
    //lectura de los pulsadores para seleccionar la conf.  
  
    configA = digitalRead(botA); //lee el estado en el que se encuentra el pulsador encargado  
de seleccionar la config A  
  
    configB = digitalRead(botB); //lee el estado en el que se encuentra el pulsador encargado  
de seleccionar la config B  
  
    configC = digitalRead(botC); //lee el estado en el que se encuentra el pulsador encargado  
de seleccionar la config C  
  
  
    if (configA == LOW || ultimaconfig == 1) {  
  
        configuno();  
  
        Serial.println("1");  
  
        ultimaconfig = 1;  
  
        EEPROM.write( eeAddress, ultimaconfig );  
  
    }  
  
    if (configB == LOW || ultimaconfig == 2) {  
  
        configdos();  
  
        Serial.println("2");  
  
        ultimaconfig = 2;  
  
        EEPROM.write( eeAddress, ultimaconfig );  
  
    }  
  
}
```

```
}  
  
if (configC == LOW || ultimaconfig == 3) {  
  
    configtres();  
  
    Serial.println("3");  
  
    ultimaconfig = 3;  
  
    EEPROM.write( eeAddress, ultimaconfig );  
  
}  
  
}
```