



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MECÁNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN PROTOTIPO DE PRÓTESIS DE MANO TRANSRADIAL DE DOS GRADOS DE LIBERTAD CONTROLADO POR CABLES Y ACTIVADO POR VOZ

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES:

FELIPE ANDRÉS MELO FUENMAYOR

JORGE ADRIÁN MERA CRUZ

Riobamba-Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MECÁNICA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN PROTOTIPO DE
PRÓTESIS DE MANO TRANSRADIAL DE DOS GRADOS DE
LIBERTAD CONTROLADO POR CABLES Y ACTIVADO POR
VOZ**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: FELIPE ANDRÉS MELO FUENMAYOR

JORGE ADRIÁN MERA CRUZ

DIRECTOR: ING. SÓCRATES MIGUEL AQUINO ARROBA

Riobamba-Ecuador

2023

© 2023, Felipe Andrés Melo Fuenmayor y Jorge Adrián Mera Cruz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotros, Felipe Andrés Melo Fuenmayor y Jorge Adrián Mera Cruz, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba 13 de Junio de 2023,



Felipe Andrés Melo Fuenmayor

C.I: 060435138-7



Jorge Adrián Mera Cruz

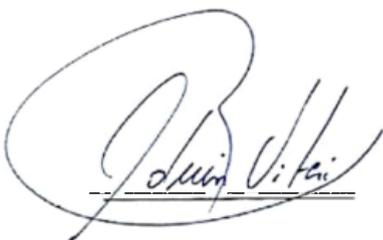
C.I: 180436004-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA MECÁNICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN PROTOTIPO DE PRÓTESIS DE MANO TRANSRADIAL DE DOS GRADOS DE LIBERTAD CONTROLADO POR CABLES Y ACTIVADO POR VOZ.**”, realizado por los señores **FELIPE ANDRÉS MELO FUENMAYOR Y JORGE ADRIÁN MERA CRUZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DE TRIBUNAL		2023/06/13
Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023/06/13
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023/06/13

DEDICATORIA

Todo lo que soy, se lo dedico con mucho cariño a mis padres Carlos y Germania que no solo me guiaron si no que me apoyaron incondicionalmente en este viaje, a mis hermanos Sebastián y Anahí por ser mi ejemplo y apoyo a lo largo de estos años, a mi abuelita Esther por toda su paciencia y ánimos que me dio, a mis familiares por apoyarme todo el tiempo, a mis amigos por darme ánimos cuando me vi caer por que solo ellos saben cuánto nos costó y todos los sacrificios que hicimos, a Ramon por ayudarme a llevar este largo camino y especialmente a mi abuelito Eudoro que partió hace poco de mi lado gracias por siempre apoyarme y confiar en mi para terminar este viaje gracias por ser mi guía en las siguientes etapas de mi vida.

Felipe Andrés Melo Fuenmayor

El camino que recorrí no fue nada fácil y este logro se lo dedico a mis padres Jorge y Cecilia que estuvieron ahí para mí sin importar lo que pase sin su apoyo no hubiera sido capaz de llegar a donde estoy en este momento todo esto es gracias a ustedes y a mi hermano Sebas el que siempre estuvo ahí preocupado por mí y me apoyo como un bueno amigo, a toda mi familia que siempre estuvo ahí animándome al no rendirme y seguir este sueño, a Vane que siempre estuvo en este largo camino ahí alentándome en todas mis caídas.

Jorge Adrián Mera Cruz

AGRADECIMIENTO

Mi eterno agradecimiento primero a mis padres, hermanos y a mi familia por ser mi mayor motivación, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, pero de manera especial a la Escuela de Ingeniería mecánica por permitirme obtener un título que anhelaba y permitirme decir orgullosamente que soy ingeniero mecánico.

Agradecer a mis amigos con los cuales compartí momentos inolvidables con los cuales tengo experiencias únicas y recuerdos que perduraran para siempre.

Un agradecimiento a mis docentes que me formaron en esta maravillosa carrera, pero en especial a los ingenieros Miguel Aquino y Geovanny Novillo quienes nos apoyaron y nos guiaron para la culminación de este proyecto.

Felipe Andrés Melo Fuenmayor

Agradezco a dios por la salud y la fortaleza que me brindo para poder llegar a cumplir un gran sueño en mi vida, a mis padres, mi hermano y toda mi familia que sin importar nada las peleas y todo estuvieron ahí, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a la carrera de ingeniería mecánica que me enseñó a no solo estudiar en un establecimiento, sino que me hicieron sentir en familia y brindarme todo para ser un ingeniero mecánico.

Agradezco a todos mis amigos que me brindaron su apoyo su cariño a lo largo de este camino todo lo que vivimos quedara guardado en mi corazón.

Les agradezco de todo corazón a los ingenieros que nos ayudaron a culminar este sueño que no solo fueron docentes sino fueron amigos al ingeniero Miguel Aquino y Geovanny Novillo, sigan siendo como son su manera de enseñar única todo lo que nos compartieron no lo vamos a olvidar y gracias no solo por sus enseñanzas sino también por sus consejos.

Jorge Adrián Mera Cruz.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.3.1. <i>Justificación teórica</i>	3
1.3.2. <i>Justificación metodológica</i>	3
1.3.3. <i>Justificación socioeconómica</i>	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Niveles de amputación.....	5
2.2. Desarticulación de la muñeca.....	6
2.3. Amputación por abajo de codo (Transradial).....	6
2.4. Estructura de una mano.....	6
2.5. Prótesis transradial.....	6
2.6. Modelos de prótesis disponibles en el mercado.....	7
2.6.1. <i>I-Limb quantum</i>	7
2.6.2. <i>Azzurra hand</i>	7
2.7. Diseño mecánico.....	7
2.8. Modelo general de una prótesis de mano.....	8

2.9.	Tipos de movimientos de una mano.....	8
2.10	Extensor corto y largo del pulgar	9
2.11	Flectores.....	9
2.12.	Mecanismos usados en prótesis.....	10
2.13	Mecanismo de flexión.	10
2.14	Mecanismo de extensión	11
2.15.	Modelo resultante	11
2.16.	Impresión 3D.....	12
2.17.	Microcontrolador.....	12
2.18	Tipos de microcontroladores.....	13
2.18.1.	<i>BITS</i>	14
2.18.2.	<i>Memoria</i>	14
2.18.3.	<i>Conjunto de instrucciones</i>	14
2.18.4.	<i>Arquitectura de la memoria</i>	14
2.19	Cómo elegir el microcontrolador.	14
2.20	Sistema del actuador.....	15
2.20.1.	<i>Servomotor</i>	15
2.21	Sensores.	15
2.21.1.	<i>Módulo de reconocimiento de voz V3</i>	15

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO.....	17
3.1.	Antropometría de la mano y parámetros de diseño.	17
3.2.	Antropometría de la mano.	17
3.3.	Especificaciones de la prótesis.....	17
3.3.1.	<i>Matriz morfológica</i>	17
3.3.2.	<i>Resultado de la matriz</i>	18
3.4.	Matriz QFD	18
3.4.1.	<i>Voz del usuario (VOC)</i>	19
3.4.2.	<i>Voz del ingeniero</i>	19
3.4.3.	<i>Resultado de la matriz QFD</i>	19
3.4.4.	<i>Conclusiones de la matriz QFD</i>	20
3.5.	Análisis de funcionalidad.....	20
3.5.1.	<i>Definición de módulos</i>	21
3.6.	Diseño mecánico	22

3.7.	Mecanismo de transmisión de movimiento	23
3.7.1.	<i>Simulación del modelo</i>	25
3.7.1.1.	<i>Dedo pulgar</i>	25
3.7.1.2.	<i>Dedo índice</i>	25
3.7.1.3.	<i>Dedo medio</i>	25
3.7.1.4.	<i>Dedo anular</i>	26
3.7.1.5.	<i>Dedo meñique</i>	26
3.7.2.	<i>Mallado del modelo</i>	26
3.7.2.1.	<i>Dedo pulgar</i>	27
3.7.2.2.	<i>Dedo índice</i>	27
3.7.2.3.	<i>Dedo medio</i>	27
3.7.2.4.	<i>Dedo anular</i>	28
3.7.2.5.	<i>Dedo meñique</i>	28
3.8.	Selección de los actuadores.....	29
3.9.	Parámetros de la funcionalidad	29
3.9.1.	<i>Parte electrónica</i>	29
3.9.1.1.	<i>Servomotor.....</i>	29
3.9.1.2.	<i>Módulo de voz.....</i>	29
3.9.1.3.	<i>Arduino</i>	30
3.9.2.	<i>Parte mecánica.....</i>	30
3.9.2.1.	<i>Hilo Nailon.</i>	30
3.9.2.2.	<i>Material rígido de impresión</i>	30
3.9.2.3.	<i>Material flexible de impresión</i>	31
3.10.	Parámetros generales.....	31
3.10.1.	<i>Impresora 3D</i>	31
3.11.	Parámetros de trabajo de la mano.....	31
3.12.	Comandos	32
3.13.	Diseño CAD prótesis.	32
3.14.	Diseño del mecanismo.....	34
3.14.1.	<i>Planteamiento de las ecuaciones de movimiento.....</i>	34
3.14.1.1.	<i>Dedo pulgar</i>	34
3.14.1.2.	<i>Dedo índice</i>	34
3.14.1.3.	<i>Dedo medio</i>	34
3.14.1.4.	<i>Dedo anular</i>	35
3.14.1.5.	<i>Dedo meñique</i>	35
3.15.	Cinemática directa	35
3.16.	Cinemática inversa	36

3.17.	Selección de los materiales	38
3.17.1.	<i>Selección técnica del material.....</i>	38
3.17.2.	<i>Selección por software CES Edupack.</i>	39
3.18.	Parámetros de impresión.....	39
3.18.1.	<i>PLA</i>	39
3.18.2.	<i>TPU</i>	40
3.19.	Modelado del primer prototipo.....	40
3.20.	Prototipo impreso	41
3.21.	Circuito.....	42
3.21.1.	<i>Detalle del sistema.....</i>	42
3.21.2.	<i>Diagrama del circuito</i>	43
3.22.	Construcción	43
3.23.	Componentes de la prótesis y tecnología de construcción.....	43
3.24.	Programación.....	44
3.24.1.	<i>Procedimiento para programar el módulo de voz.....</i>	44
3.25.	Proceso de ensamble	46
3.25.1.	<i>Elementos para la construcción</i>	46
3.25.1.1.	<i>Construcción e impresión de la prótesis transradial.....</i>	47
3.25.2.	<i>Flujogramas de la construcción</i>	51
3.25.2.1.	<i>Flujograma de la construcción del sistema motriz.....</i>	51
3.25.2.2.	<i>Flujograma de la construcción del sistema electrónico</i>	52
3.26.	Montaje de la prótesis.....	52
3.26.1.	<i>Montaje del sistema motriz</i>	52
3.26.2.	<i>Montaje del sistema electrónico</i>	52
3.26.3.	<i>Flujograma del montaje de la prótesis</i>	53
3.27.	Pruebas	53
3.27.1.	<i>Pruebas en vacío</i>	53
3.27.2.	<i>Pruebas con objetos</i>	54
3.27.2.1.	<i>Toma de objetos ligeramente pesados.....</i>	54
3.27.2.2.	<i>Toma de objetos moldeables</i>	54
3.27.2.3.	<i>Toma de objetos delicados</i>	55
3.27.2.4.	<i>Toma de objetos pequeños</i>	55
3.27.2.5.	<i>Toma de objetos comunes</i>	56
3.27.2.6.	<i>Movimiento dinámico.....</i>	56
3.27.2.7.	<i>De escritura.....</i>	56
3.27.3.	<i>Resumen de las pruebas</i>	57

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	58
4.1.	Protocolo de pruebas	58
4.2.	Resultados de ANSYS.....	58
4.2.1.	<i>Dedo pulgar</i>	<i>58</i>
4.2.2.	<i>Dedo índice.....</i>	<i>59</i>
4.2.3.	<i>Dedo medio.....</i>	<i>61</i>
4.2.4.	<i>Dedo anular</i>	<i>62</i>
4.2.5.	<i>Dedo meñique</i>	<i>63</i>
4.3.	Matrices de resultados	64
4.4.	Manual de operación	64
4.4.1.	<i>Vista general del equipo</i>	<i>64</i>
4.4.2.	<i>Accesorios de la prótesis</i>	<i>64</i>
4.4.2.1.	<i>Porta sistema de control</i>	<i>64</i>
4.4.2.2.	<i>Micrófono</i>	<i>64</i>
4.5.	Características de la prótesis.....	65
4.6.	Instalación del equipo.....	65
4.6.1.	<i>Requisitos necesarios</i>	<i>66</i>
4.7.	Instrucciones de operación.....	66
4.7.1.	<i>Intercambio del hilo nylon.....</i>	<i>66</i>
4.7.2.	<i>Intercambio de las articulaciones</i>	<i>67</i>
4.8.	Manual de mantenimiento.....	68
4.9.1.	<i>Costos directos.....</i>	<i>69</i>
4.9.1.1.	<i>Costos de los materiales</i>	<i>69</i>
4.9.1.2.	<i>Costos de los equipos y herramientas</i>	<i>70</i>
4.9.1.3.	<i>Costos de mano de obra y transporte.....</i>	<i>70</i>
4.9.1.4.	<i>Costo total directo</i>	<i>70</i>
4.9.2.	<i>Costos indirectos</i>	<i>71</i>
4.9.2.1.	<i>Costo Ingenieril</i>	<i>71</i>
4.9.3.	<i>Costo total.....</i>	<i>71</i>
	CONCLUSIONES.....	72
	RECOMENDACIONES.....	73
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-3: Medidas generales de la mano.	17
Tabla 2-3: Longitud de las falanges de la mano.	17
Tabla 3-3: Matriz morfológica.	18
Tabla 4-3: Características del servomotor.	29
Tabla 5-3: Características del sensor de voz.	29
Tabla 6-3: Características del arduino.	30
Tabla 7-3: Características del hilo nylon.	30
Tabla 8-3: Características del PLA.	30
Tabla 9-3: Características del TPU.	31
Tabla 10-3: Características de la impresora 3D.	31
Tabla 11-3: Parámetros de trabajo.	31
Tabla 12-3: Lista de comandos.	32
Tabla 13-3: Resultados de la cinemática directa.	36
Tabla 14-3: Resultados de la cinemática inversa.	36
Tabla 15-3: Tabla resumen de velocidades y aceleraciones de los dedos.	38
Tabla 16-3: Comparación técnica de los materiales.	38
Tabla 17-3: Parámetros de impresión del PLA.	39
Tabla 18-3: Parámetros de impresión del TPU.	40
Tabla 19-3: Esquemas de los sistemas de la prótesis.	44
Tabla 20-3: Elementos para la construcción de la prótesis.	46
Tabla 21-3: Elementos y su proceso de construcción.	47
Tabla 22-3: Resumen de los materiales con horas.	49
Tabla 23-3: Listado de subensambles.	50
Tabla 24-3: Proceso de montaje del sistema motriz.	52
Tabla 25-3: Proceso de montaje del sistema electrónico.	52
Tabla 26-3: Tiempo de montaje de la prótesis.	53
Tabla 27-3: Análisis de las pruebas en vacío.	54
Tabla 28-3: Análisis de la toma de objetos ligeros.	54
Tabla 29-3: Análisis de la toma de objetos moldeables.	54
Tabla 30-3: Análisis de la toma de objetos frágiles.	55
Tabla 31-3: Análisis de la toma de objetos pequeños.	55
Tabla 32-3: Análisis de la toma de objetos comunes.	56
Tabla 33-3: Análisis del movimiento dinámico.	56
Tabla 34-3: Análisis del movimiento de escritura.	56

Tabla 35-3: Tabla de resumen del cumplimiento.	57
Tabla 1-4: Observaciones de los comandos.....	64
Tabla 2-4: Características de la prótesis.	65
Tabla 3-4: Cambio de los hilos nylon.....	66
Tabla 4-4: Cambio de las articulaciones.....	67
Tabla 5-4: Tiempos para revisión de los elementos que sufren desgaste.....	68
Tabla 6-4: Partes de la prótesis.	69
Tabla 7-4: Costo de los materiales.	69
Tabla 8-4: Costos de los equipos y herramientas.	70
Tabla 9-4: Costos de mano de obra y transporte.	70
Tabla 10-4: Costo total directo.....	70
Tabla 11-4: Costos indirectos.....	71
Tabla 12-4: Costo total de la prótesis.	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2: Niveles de amputación propuestos por Schwartz.	5
Ilustración 2-2: Prótesis transradial y mano.	6
Ilustración 3-2: Modelo de prótesis biónica.	7
Ilustración 4-2: Modelo prótesis mecánica.	7
Ilustración 5-2: Diagrama de las articulaciones.	8
Ilustración 6-2: Composición de una prótesis de mano.	8
Ilustración 7-2: Movimientos principales de una mano.	9
Ilustración 8-2: Movimiento extensor del pulgar.	9
Ilustración 9-2: Movimiento flexor de los dedos.	10
Ilustración 10-2: Prótesis activada por poleas o cuerdas.	10
Ilustración 11-2: Mecanismo del dedo.	11
Ilustración 12-2: Mecanismo del dedo acoplado con elastómero.	11
Ilustración 13-2: Modelo del prototipo del dedo.	12
Ilustración 14-2: Proceso de impresión 3D.	12
Ilustración 15-2: Funcionamiento de un microcontrolador.	13
Ilustración 16-2: Funcionamiento de un servomotor.	15
Ilustración 17-2: Módulo de voz V3.	16
Ilustración 1-3: QFD de la prótesis transradial.	20
Ilustración 2-3: Función primaria de la prótesis.	21
Ilustración 3-3: Descripción de funcionalidad.	21
Ilustración 4-3: Estructura modular.	22
Ilustración 5-3: Mecanismo de la mano.	23
Ilustración 6-3: Representación de la vista frontal de la palma.	24
Ilustración 7-3: Análisis en ANSYS del dedo pulgar.	25
Ilustración 8-3: Análisis en ANSYS del dedo índice.	25
Ilustración 9-3: Análisis en ANSYS del dedo medio.	26
Ilustración 10-3: Análisis en ANSYS del dedo anular.	26
Ilustración 11-3: Análisis en ANSYS del dedo meñique.	26
Ilustración 12-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo pulgar.	27
Ilustración 13-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo índice.	27
Ilustración 14-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo medio.	28
Ilustración 15-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo anular.	28
Ilustración 16-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo meñique.	28
Ilustración 17-3: Primer prototipo.	32
Ilustración 18-3: Interferencias del primer prototipo.	33

Ilustración 19-3: Prototipado rápido de la palma	33
Ilustración 20-3: Correcciones del modelo.	33
Ilustración 21-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo pulgar.	34
Ilustración 22-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo índice.	34
Ilustración 23-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo medio.....	34
Ilustración 24-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo anular.....	35
Ilustración 25-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo meñique.	35
Ilustración 26-3: Curva del dedo pulgar	37
Ilustración 27-3: Curva Posición vs Velocidad.....	37
Ilustración 28-3: Curva Posición vs Aceleración.....	37
Ilustración 29-3: Selección de material en CES Edupack.....	39
Ilustración 30-3: Prototipo funcional sin estilizar.	41
Ilustración 31-3: Vista general de yemas con TPU.....	41
Ilustración 32-3: Modelo mecánico de la mano.	42
Ilustración 33-3: Comparativa entre la mano y el modelo mecánico.	42
Ilustración 34-3: Diagrama del circuito.	43
Ilustración 35-3: Proceso de grabación de voz.	45
Ilustración 36-3: Carga de los comandos.....	46
Ilustración 37-3: Verificación de carga de las acciones.	46
Ilustración 38-3: Flujograma del sistema motriz.	51
Ilustración 39-3: Flujograma del sistema electrónico.	52
Ilustración 40-3: Proceso de montaje.....	53
Ilustración 1-4: Movimiento resultante del dedo pulgar.....	59
Ilustración 2-4: Esfuerzo tensor del dedo pulgar.	59
Ilustración 3-4: Esfuerzo von-Mises del dedo pulgar.	59
Ilustración 4-4: Movimiento resultante del dedo índice.....	60
Ilustración 5-4: Esfuerzo tensor del dedo índice.....	60
Ilustración 6-4: Esfuerzo Von-Mises del dedo índice.....	60
Ilustración 7-4: Movimiento resultante del dedo pulgar.	61
Ilustración 8-4: Esfuerzo tensor del dedo medio.....	61
Ilustración 9-4: Esfuerzo Von-Mises del dedo medio.....	61
Ilustración 10-4: Movimiento resultante del dedo anular.	62
Ilustración 11-4: Esfuerzo tensor del dedo anular.....	62
Ilustración 12-4: Esfuerzo Von-Mises del dedo anular.....	62
Ilustración 13-4: Movimiento resultante del dedo meñique.....	63
Ilustración 14-4: Esfuerzo tensor del dedo meñique.....	63
Ilustración 15-4: Esfuerzo Von-Mises del dedo índice.....	63

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: TOMA DE MEDIDAS

ANEXO B: COMPONENTES DEL PROTOTIPO

ANEXO C: PREENSAMBLES

ANEXO D: PRUEBAS

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue conseguir un prototipo de prótesis transradial que tenga dos grados de libertad, accionado mediante comandos de voz y que posea una forma orgánica lo más cercana a una mano. Partiendo de un análisis de mecanismos que se realizó a las falanges respectivamente de cada dedo como si fueran un eslabón, se dividió en dos mecanismos diferentes, los dedos que están compuestos por tres falanges y el dedo pulgar que tiene dos falanges, del mecanismo se consiguió las posiciones, velocidades que dieron 0.62mm/s y una aceleración de 1.172 mm/s² del cómo van a estar actuando los dedos sin considerar la fuerza, el esfuerzo de las cuerdas no fue analizada ya que la sujeción la produce la de fricción de los dedos con el objeto, con la base del mecanismo se procedió a obtener un modelo CAD el cual cumpla con los requerimientos del mecanismo, la unión del mecanismo y el modelo da un prototipo en estilo mecánico con partes con formas geométricas, partiendo del modelo mecánico se realizó el control por voz para este caso el sensor usado fue el Voice Recognition V3, que proporciona siete comandos a usar, automatizando este sistema se consiguió dar funcionamiento y posteriormente con este modelo y un software de escultura 3D se logró el prototipo final. El modelo resultante se acopla a los objetos, pero al pasar 220 gramos de peso ya no es capaz de soportar dicha carga ya que los dedos dependen de la fricción del material, con un mejor micrófono se logró mejorar el accionamiento de la misma manera al tener un sistema de carga que se pueda realizar de manera fácil se obtiene un prototipo funcional. Se recomienda para un mejor agarre incrementar un grado de libertad en el pulgar.

Palabras clave: <PRÓTESIS TRANSRADIAL> <ELASTÓMERO> <SENSOR DE VOZ>
<MECANISMO DE CUERDAS> <PROTOTIPO>.

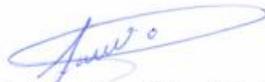
1294-DBRA-UPT-2023



SUMMARY

The objective of this work was to achieve a transradial prosthesis prototype that has two degrees of freedom, activated by voice commands and that has an organic shape as close to a hand. Starting from an analysis of mechanisms that was carried out on the phalanges respectively of each finger as if they were a link, it was divided into two different mechanisms, the fingers that are composed of three phalanges and the thumb that has two phalanges, from the mechanism it was obtained the positions, speeds that gave 0.62mm/s and an acceleration of 1.172 mm/s² of how the fingers will be acting without considering the force, the effort of the strings was not analyzed since the grip is produced by the friction of the fingers with the object, with the base of the mechanism, a CAD model was obtained which meets the requirements of the mechanism, the union of the mechanism and the model gives a prototype in mechanical style with parts with geometric shapes, starting from the mechanical model, a for voice control in this case, the sensor used was VoiceRecognition V3, which provides seven commands to use. By automating this system, it was possible to operate and later with this model and 3D sculpture software, the final prototype was achieved. The resulting model is attached to the objects, but when passing 220 grams of weight it is no longer capable of supporting said load since the fingers depend on the friction of the material, with a better microphone it was possible to improve the drive in the same way by having a charging system that can be made easily, a functional prototype is obtained. It is recommended for a better grip to increase one degree of freedom in the thumb.

Keywords: <TRANSRADIAL PROSTHESIS> <ELASTOMER> <VOICE SENSOR>
<WINDING MECHANISM> <PROTOTYPE>.



Lic. Luis Francisco Mantilla Cabrera Mgs.

CI:0603747809

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador existe pocas opciones respecto a lo que es prótesis, a más de ser costosas solo se considera el aspecto estético y no funcional, analizando este punto no se puede lograr dar una ayuda a las personas para que se puedan desempeñar en actividades cotidianas como lo solían hacer antes de usar una prótesis, en este caso en específico son las prótesis de mano siendo estas indispensables para realizar trabajos.

Existen muchas prótesis en el Ecuador y en específico las de miembros superiores, para muchos ecuatorianos es muy complicado conseguir una ellas aun siendo solo estéticas, esto influye mucho no solo física sino psicológicamente en las personas.

Los materiales usados comúnmente son el polipropileno y polietileno, estos son muy comunes al ser plásticos rígidos. Con los años se ha conseguido dar muchos usos en la construcción de prótesis ya sea de miembros superiores y una combinación cosmética con prótesis para miembros inferiores.

Hoy en día el prototipado y la construcción que se hace mediante impresión 3D está facilitando la elaboración de diferentes modelos y muchos productos, de una manera muy practica se toma un modelo tridimensional y mediante un sistema de inyección a más de 220°C el material se funde y este se lo coloca en pequeñas capas se logra un modelo exacto al diseñado, los materiales que comúnmente se usan son PLA este al ser un polímero plástico presenta una resistencia mecánica en su dureza y flexibilidad, también existe materiales como el ABS que este presenta una dureza mucho mayor pero es más costoso y difícil de lograr una buena impresión, esto por lo general ya es usado en una producción en masa con impresoras 3D que se venden en el mercado mundial.

La impresión 3D se está desarrollando a pasos gigantescos, cada año se crea nuevos materiales para diferentes trabajos en los cuales se puede aprovechar por la versatilidad que prestan, creando así de esta manera nuevos métodos de fabricación con bajos costos y a su vez igual de eficientes. En el presente trabajo lo que se busca es generar un prototipo de prótesis para personas adultas que tengan una amputación de tipo transradial, para lo cual se considera aplicar el diseño de la mano mediante software, su accionamiento es con un mecanismo de cuerdas mismas que ayudarán a la activación de los dedos, para la construcción se lo hace mediante la impresión 3D y así se consigue un prototipo igual al diseñado el mismo que será comparado y puesto a prueba con su funcionalidad, para la activación se coloca un sistema de control que es activado por la voz, esto permitirá al usuario realizar movimientos específicos y de esta manera facilitar las actividades que son comunes en el día a día de la persona.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

En la ESPOCH se tiene un grupo de investigación especializado en el desarrollo de la bioingeniería como lo es el grupo de investigación GIEBI perteneciente a la Facultad de Mecánica, el grupo de investigación ha presentado varios proyectos con respecto a la implementación de prótesis y varias prótesis han sido donados a personas que lo requieren, el proyecto más nuevo e innovador que se presentó es el proyecto SIV 21 denominado “Desarrollo de prototipo de exoesqueleto para rehabilitación física en miembros inferiores”, cuya finalidad principal es la de mejorar las condiciones de vida de las personas con discapacidad severa.

Entre otros también se destaca los prototipos logrados en “Diseño y fabricación de una prótesis mioeléctrica para amputaciones transradiales” en el cual se logró crear un prototipo funcional por medio de una señal mioeléctrica que acciona los dedos, de esta manera obtuvo un movimiento que sea a voluntad y tenga relación con la señal que emiten los músculos (García F y Bigio D).

En muchos trabajos de titulación como “Diseño y simulación de prótesis transradial para pacientes amputados” mediante parametrización, procesamiento digital de imágenes y adquisición de señales electromiografías se logró tener un prototipo de prótesis el cual fue completamente personalizado para una persona, se busca con el presente trabajo es tener un prototipo para una población en general que sea de bajo costo y sea adaptable (Alonso E, Jimmy R).

En otros tipos de trabajo también se considera la fabricación de prototipos mediante impresión 3D como lo hacen en “Diseño de Prótesis de mano servo actuada y fabricación de prototipo con técnicas de impresión 3D” en el cual se fabrica mediante impresión 3D el prototipo y este resulta ser funcional, de costo bajo a relación de la fabricación antigua de prótesis en la que muchos casos se usa fibra de vidrio y otros materiales que tienen un proceso muy largo y costoso (Morillo M).

1.2. Planteamiento del problema

Realizando un análisis de personas con discapacidad en el Ecuador existen 121.836 que es el 60,52% de solo hombres adultos, considerados desde los 25 años hasta los 64 años que tienen una discapacidad física entre estas tienen una amputación transradial.

En el Ecuador una prótesis puede variar los costos desde los \$8000 dependiendo del nivel de amputación y la funcionalidad, existiendo pocas entidades entre públicas y privadas que dan una solución a esta problemática ya que las personas que sufren de esto son de escasos recursos y no son capaces de optar por una prótesis de esta manera se encuentran limitadas para poder realizar un trabajo o tener una vida normal, en muchas personas no solo provocan un problema físico sino en casi todos los casos lleva un problema psicológico.

Lo que se quiere lograr con el presente proyecto es obtener una prótesis que sea capaz de estar al alcance de todas las personas y no solo sea una prótesis estática, sino que esta sea capaz de brindar una movilidad la cual sea de utilidad para poder realizar tareas cotidianas y ayuden de esta manera a las personas.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación teórica

Para la elaboración del prototipo se considera conocimientos tanto teóricos como prácticos adquiridos en el transcurso de la carrera en el cual es necesario aplicar conocimientos de Mecanismos, Método de Elemento Finito, Diseño de Equipos y Elementos Mecánicos, Electrónica, Materiales y Dinámica como tal para poder tener un desarrollo completo del prototipo, con todos estos conocimientos se quiere llegar a un prototipo de prótesis completamente funcional y estilizado.

1.3.2. Justificación metodológica

Para el desarrollo del prototipo se considera conocimientos teóricos y aplicados por medio de softwares los cuales van a validar el mismo no solo estético sino también funcional, se lo construirá mediante impresión 3D la cual nos ayudará a tener un modelo exacto al cual se realizó el diseño de esta manera se aplicaría un método teórico práctico para solventar la problemática.

1.3.3. Justificación socioeconómica

Con este trabajo se quiere llegar a personas de escasos recursos debido a que en el país este tipo de prótesis son demasiado costosas y no están al alcance de muchos, aplicando conocimientos y métodos de construcción se logra abaratar costos y tener una prótesis que va a ser funcional y de bajo costo dirigido a todo tipo de personas que tengan esta afectación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir una prótesis de mano transradial accionada por un mecanismo de cuerdas y controlada mediante comandos de voz.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros de funcionalidad de la prótesis
- Realizar el diseño conceptual de la prótesis y del mecanismo
- Diseñar el mecanismo accionado por cuerdas de dos grados de libertad
- Diseñar una prótesis con un modelo estilizado para una persona hombre adulto ecuatoriana.
- Imprimir en 3D los componentes de las prótesis, ensamblarlas y realizar pruebas.
- Acoplar el mecanismo accionado por cuerdas de dos grados de libertad a las piezas impresas en 3D y verificar la funcionalidad.
- Automatizar mediante comandos de voz el mecanismo accionado por cuerdas con dos grados de libertad.
- Evaluar los resultados de las pruebas de funcionamiento de la prótesis.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Niveles de amputación

Cuanto mayor es la amputación, más articulaciones se pierden existe menos potencia, pérdida muscular. Por lo tanto, en la medida de lo posible, se debe preservar la extremidad comprometida, teniendo en cuenta no solo su longitud, sino también sus niveles funcionales, es decir, las articulaciones.

Los niveles de amputación se clasifican de acuerdo con la topográfica de Schwartz:

Miembros superiores:

- Interescapulotorácico.
- Desarticulación de hombro.
- Amputación por encima de codo.
- Desarticulación de codo.
- Amputación muy corta bajo codo.
- Amputación por debajo de codo.
- Amputaciones parciales de mano.

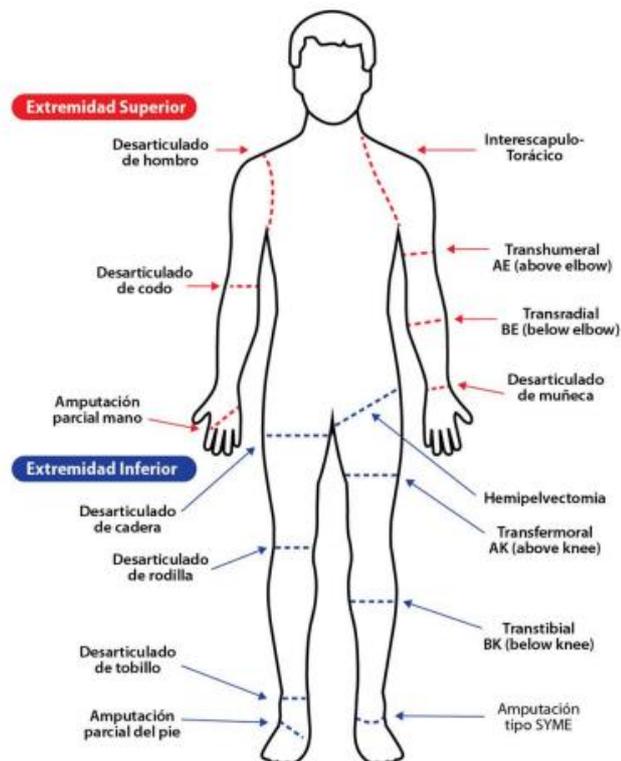


Ilustración 1-2: Niveles de amputación propuestos por Schwartz.

Fuente: (López 2018)

2.2 Desarticulación de la muñeca.

Se debe considerar como una posibilidad importante por qué el porcentaje de función del brazo y el antebrazo es de mayor importancia ya que al tener codo y pronosupinación del antebrazo hasta su arco. Este a su vez favorece la realización de tareas de vestir, limpiar y determinadas labores.

2.3 Amputación por abajo de codo (Transradial)

Dependiendo del nivel al cual está la amputación, será dónde está el muñón, ya que en ciertos niveles los movimientos como flexo-extensión y pronosupinación se tendrá otro tipo de accionamiento y este nivel de amputación se tiene aún la disponibilidad del codo y un porcentaje del antebrazo.

2.4 Estructura de una mano

Para fabricar una prótesis de mano, es necesario comprender su funcionamiento natural. La mano como órgano del cuerpo humano es compleja, permite múltiples movimientos y es un miembro porque proporciona información del entorno como la temperatura, el tacto y el dolor.

Está compuesto por más de 27 huesos y 40 músculos, con lo cual tiene más de veinte grados de libertad. Hay músculos encargados del movimiento y otros encargados de limitar estos movimientos. Es muy difícil definir dónde comienza y termina cada músculo tendinoso porque se ubican de manera compleja y confusa.

2.5. Prótesis transradial

La prótesis transradial se utiliza para lesiones por debajo del codo. El funcionamiento de la prótesis es una función directa de las cualidades de diseño y fabricación. Sin embargo, se pueden encontrar pautas generales para este tipo de prótesis, como la fuerza óptima utilizada para la prótesis debido a sus materiales de fabricación la disposición de apoyos en el codo, como desventaja la dependencia del paciente de realizar el mantenimiento puede ser ineficaz. Las medidas preventivas y los sistemas de apoyo.

Existen diferentes tipos de prótesis transradial y con longitudes más largas o cortas de compromiso, actividad y preferencias individuales, se pueden fabricar con fines estéticos, para reemplazar una parte del cuerpo y finalmente con fines funcionales.



Ilustración 2-2: Prótesis transradial y mano.

Fuente: (López 2018)

2.6 Modelos de prótesis disponibles en el mercado

2.6.1. *I-Limb quantum.*

Tiene una rotación de muñeca de 360°, fuerza del actuador 5kg, alimentación 7.4v, 36 movimientos, peso 1590g.



Ilustración 3-2: Modelo de prótesis biónica.

Fuente: Adriana, H. 2019

2.6.2. *Azzurra hand.*

Tiene diez articulaciones, al ser diseñado para proyectos, peso 640 gramos, control y tiempo de respuesta depende de la construcción.



Ilustración 4-2: Modelo prótesis mecánica.

Fuente: (López López, Martínez Méndez , & Vilchis González, 2019)

2.7. Diseño mecánico

Considerando todos los movimientos posibles que puede realizar una mano humana al momento de representarlo como un sistema se puede tener de 20 a 26 grados de libertad, cada grado de libertad representa un movimiento en específico para cada articulación donde se produce el movimiento.

Para la representación del diseño de una manera simple se considera las articulaciones, rotaciones con un grado de libertad, para cada falange y la zona metacarpiana como fija, con todas estas consideraciones se puede resumir en un modelo con 15 grados de libertad.

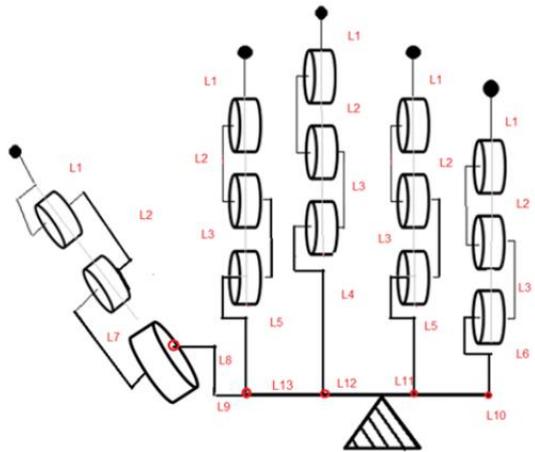


Ilustración 5-2: Diagrama de las articulaciones.

Fuente: (López López, Martínez Méndez , & Vilchis González, 2019)

2.8. Modelo general de una prótesis de mano

Para todos los modelos y siguiendo la fisonomía de la mano se toma en cuenta para cada falange como un objeto por separado, la parte de la mano como una parte independiente donde se une todo y se obtendría un modelo conceptual de una mano.

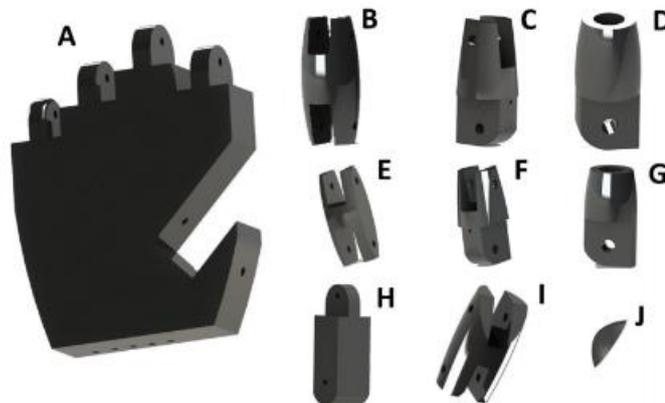


Ilustración 6-2: Composición de una prótesis de mano.

Fuente: (López López, Martínez Méndez , & Vilchis González, 2019)

2.9. Tipos de movimientos de una mano

Varios músculos y tendones actúan para realizar los movimientos. Los principales que permiten el movimiento del pulgar son:

- A. Cilíndrico
- B. De punta
- C. De gancho
- D. Palmar
- E. Esférico
- F. Lateral

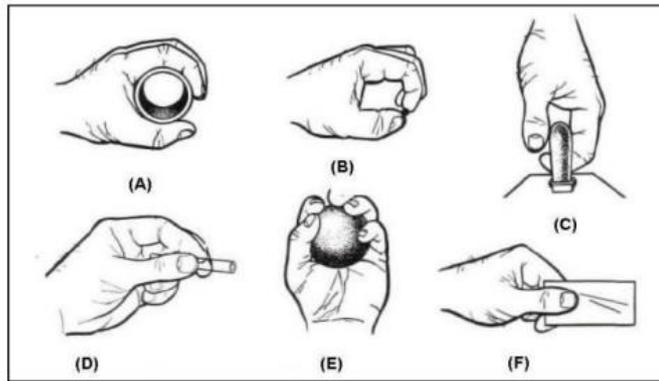


Ilustración 7-2: Movimientos principales de una mano.

Fuente: (López 2018)

2.10 Extensor corto y largo del pulgar

El extensor corto del pulgar es el músculo que se encuentra debajo del extensor largo de los dedos en la parte posterior del antebrazo y se conecta con el músculo abductor largo del pulgar. El músculo extensor largo del pulgar está ubicado en la profundidad de la parte posterior del antebrazo, inferior y medial al extensor corto del pulgar. Estos dos músculos permiten la extensión del pulgar, movimiento inverso al de los flexores.



Ilustración 8-2: Movimiento extensor del pulgar

Fuente: (López 2018)

2.11 Flectores

Como en el pulgar hay dos tipos de flexores, los cortos y los largos. Los flexores largos o profundos se encuentran principalmente en el antebrazo. Son responsables de flexionar los dedos perpendicularmente a la palma y el rango suele ser de 90°.

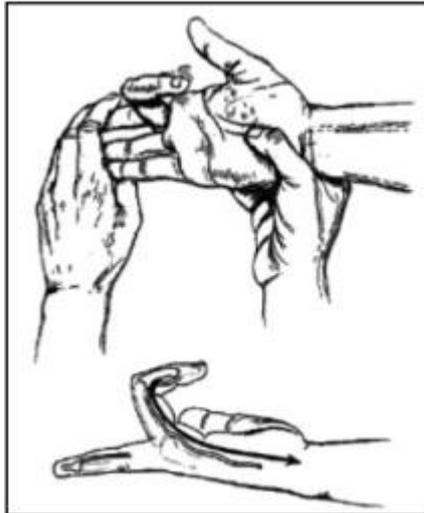


Ilustración 9-2: Movimiento flector de los dedos.

Fuente: (López 2018)

2.12. Mecanismos usados en prótesis.

Un mecanismo se puede considerar como un sistema que tiene un movimiento y una fuerza de entrada y salida. Para la emisión de los movimientos en las articulaciones de las manos y prótesis de mano, generalmente se utilizan mecanismos que permiten flexionar o estirar las falanges de los dedos. Entre estos mecanismos existentes se encuentran la transmisión por barras, que son motores instalados en cada articulación y la transmisión por cuerdas o poleas.



Ilustración 10-2: Prótesis activada por poleas o cuerdas.

Fuente: (Gorosito, J. 2017)

2.13 Mecanismo de flexión.

Existen diferentes formas de resolver mecánicamente el movimiento que tendrán las falanges acopladas entre sí para poder barrer la trayectoria perpendicular a la palma de la mano, tanto para flexionarla como para alargarla. El sistema tiene parejas por falange además tiene una o más cuerdas par para poder flexionarlo.

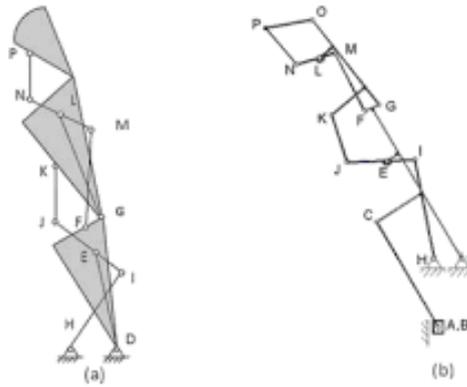


Ilustración 11-2: Mecanismo del dedo.

Fuente: (Portilla Flores, Piña Quintero, Avilés Sánchez, Niño Suárez, & Molina Vilchis, 2011)

2.14 Mecanismo de extensión

Considerando que existe una problemática al momento de querer retornar a la posición inicial de los dedos de forma mecánica se puede tener en cuenta el siguiente principio:

Elastómero. - Se puede usar como tendón extensor un material que sea capaz de deformarse y regresar a su posición inicial los más comunes son los elásticos que son muy económicos. En la impresión 3D existe un material con estas características conocido como filaflex capas de deformarse cuando existe un esfuerzo y regresar a su posición original. La desventaja de este material que al pasar el tiempo existe una relajación de las tensiones por el uso y de esta manera se pierde sus propiedades como elastómero.

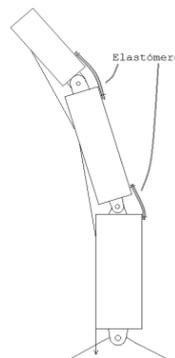


Ilustración 12-2: Mecanismo del dedo acoplado con elastómero.

Fuente: (López 2018)

2.15. Modelo resultante

Considerando el mecanismo y el modelo se puede tener como resultado por 2 barras acopladas por medio de una junta rotaciones y un elastómero que representaría cada una de las falanges, para el cálculo matemático se toma el esfuerzo del elastómero como un momento angular este siendo capaz de dar un movimiento angular en cada articulación a partir de su posición inicial. Para este análisis es necesario partir de un modelo estático sin tomar en cuenta el rose de las articulaciones y despreciando el peso de los elementos.

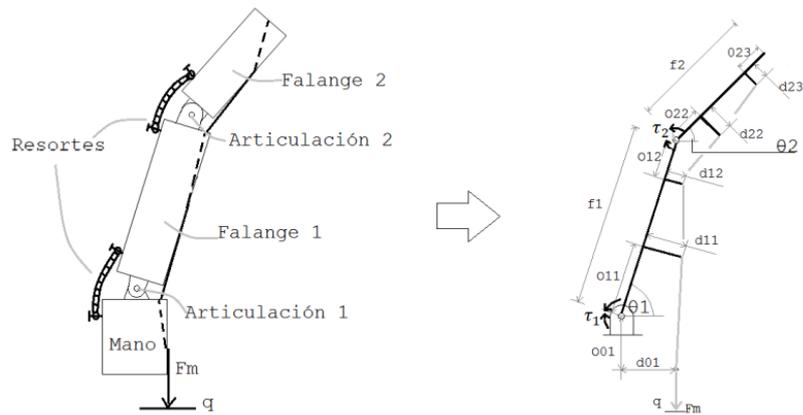


Ilustración 13-2: Modelo del prototipo del dedo.

Fuente: (López 2018)

2.16. Impresión 3D

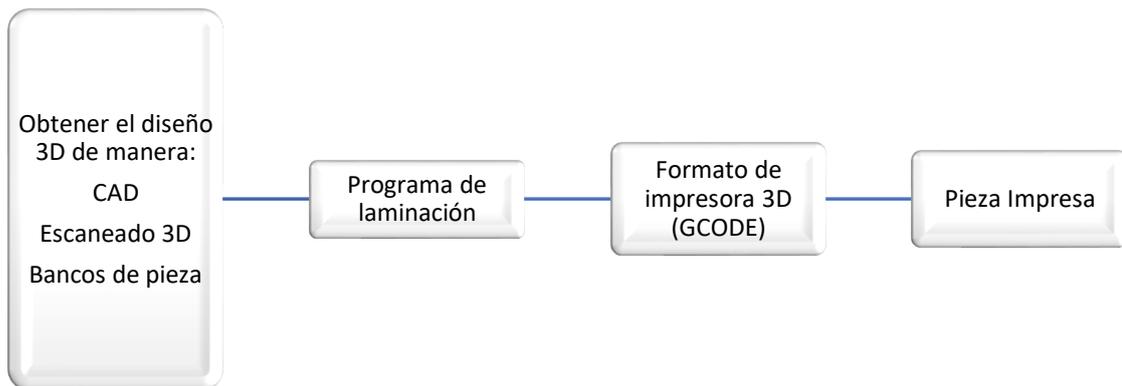


Ilustración 14-2: Proceso de impresión 3D.

Fuente: (Vázquez, 2019)

2.17. Microcontrolador

Este es el encargado del funcionamiento de un sistema con un trabajo en específico, este va a ser el encargado de recibir las órdenes y generar el movimiento de la prótesis, con esto se genera un sistema automatizado capaz de responder a las órdenes, para poder llegar a un sistema automatizado es necesario de varios componentes como primordial lo es el microcontrolador el necesita de los siguientes procesos:

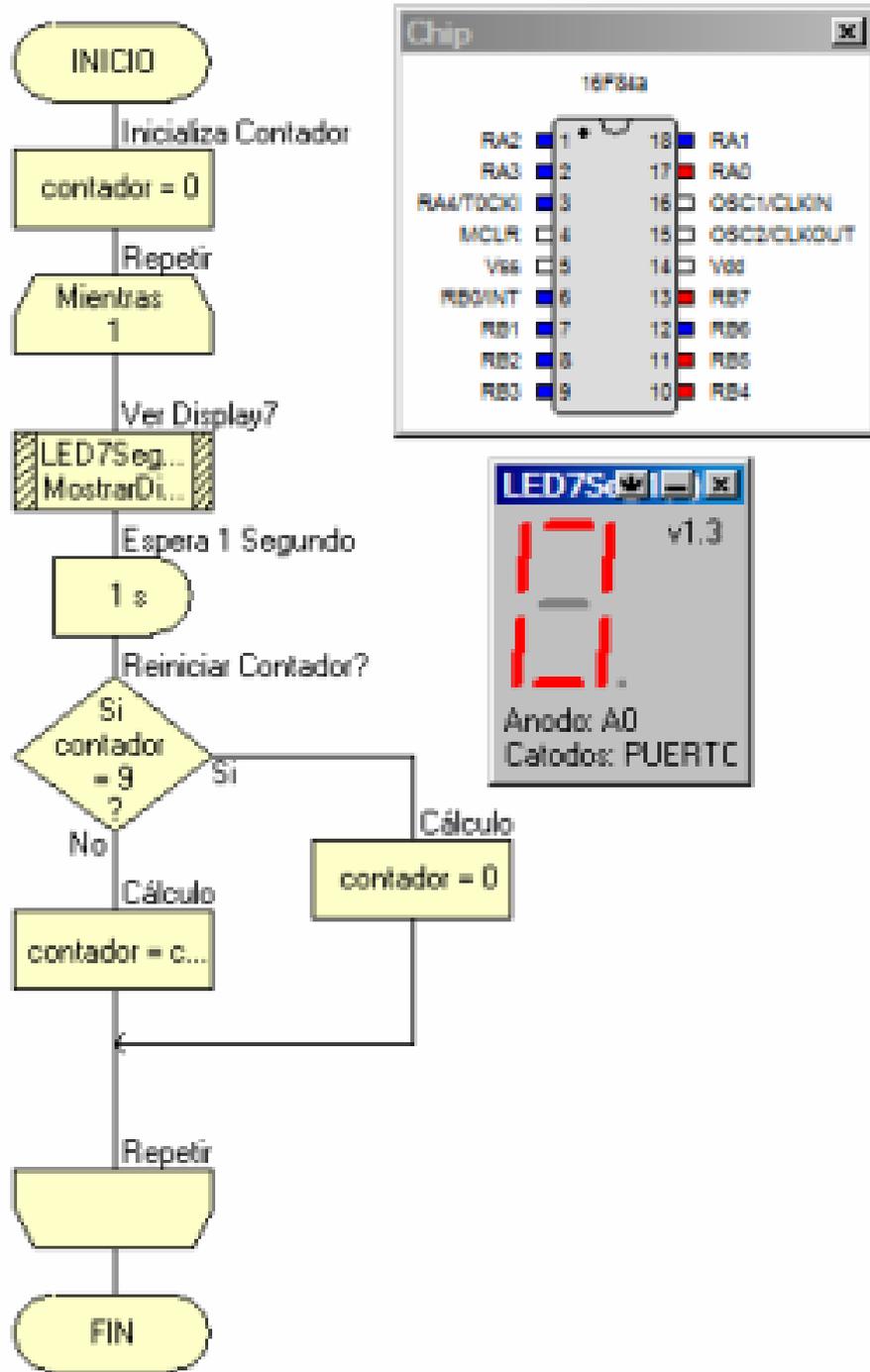


Ilustración 15-2: Funcionamiento de un microcontrolador.

Fuente: (Cortes Osorio, Mendoza Vargas, & Muriel Escobar, 2009)

2.18 Tipos de microcontroladores.

Los microcontroladores se dividen en categorías según su memoria, arquitectura, bits y conjuntos de instrucciones. Así que veamos los tipos de microcontroladores:

2.18.1. BITS:

El microcontrolador de 8 bits ejecuta la lógica de las operaciones aritméticas. Ejemplos de microcontrolador de 8 bits es Intel 8031/8051.

El microcontrolador de 16 bits se funciona tendiendo una precisión y rendimiento mayor si lo comparamos con uno de 8 bits. Ejemplo de microcontrolador de 16 bits es Intel 8096.

El microcontrolador de 32 bits cuya principal área en la que se empleara es la de dispositivos que se controlan de manera automática, como lo pueden ser máquinas de oficina, dispositivos implantables de carácter médico, entre otros. Para esto es necesario instrucciones de 32 bits para llevar a cabo cualquier operación lógica o función aritmética.

2.18.2. Memoria:

Microcontrolador de memoria externa: Cuando se construye un microcontrolador en una estructura integrada existente un chip que no formará parte de todas las partes que entran en el funcionamiento existente en el mismo, este tipo de microcontrolador lo llamaremos de memoria externa, el microcontrolador 8031 no tiene memoria de programa en el chip.

Microcontrolador de Memoria Incorporada: Un microcontrolador de memoria incrustado es aquel que se integra en todos los bloques funcionales de un chip y se utiliza para construir estructuras incrustadas, el microcontrolador 8051 tiene todos los programas, memoria de datos, contadores y temporizadores, interrupciones, puertos de E/S y, por lo tanto, es un microcontrolador de memoria integrado.

2.18.3. Conjunto de instrucciones:

CISC-CISC: Conocido por sus siglas como computador con set de instrucciones complejas, el usuario tiene la capacidad de utilizar una sola instrucción como una opción en lugar de utilizar múltiples instrucciones simples.

RISC-RISC: Significa Ordenador de conjunto de instrucciones reducido. RISC reduce el tiempo de operación al acortar el ciclo de reloj por instrucción.

2.18.4. Arquitectura de la memoria:

Microcontrolador de Arquitectura de Memoria Harvard

Microcontrolador de Arquitectura de Memoria Princeton

2.19 Cómo elegir el microcontrolador.

La compatibilidad con el hardware y los sistemas ya instalados. Desde el tipo de sensores, hasta las interfaces de comunicación. La elección del microcontrolador debe permitir una integración suave, que no requiera modificaciones importantes del entorno donde se va a instalar.

2.20 Sistema del actuador.

Mediante la información que recibe el microcontrolador éste transforma una señal que viene dada en energía eléctrica y la convierte en una energía cinética. Esta mediante un sistema mecánico se convierte en energía mecánica la cual nos daría como resultado el movimiento de los dedos.

2.20.1. Servomotor

Este servomotor o actuador es el encargado de recibir una señal de un microcontrolador y llevarlo a un movimiento cinético, según el tiempo de la señal emitida se puede tener una posición en específico.

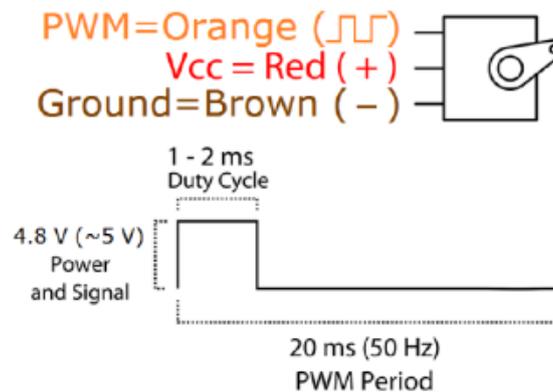


Ilustración 16-2: Funcionamiento de un servomotor.

Fuente: Gorosito, J. 2017

Tipos de servomotor

Pueden ser rotativos o lineales.

Los servomotores rotativos pueden ser de corriente alterna, de corriente continua o motores paso a paso. Tenemos dos tipos de servomotores de corriente continua: los clásicos de escobillas, y los de la nueva tecnología de motores de cc sin escobillas BLDC (=brushless DC). En ausencia de especificaciones adicionales, se asume que un servomotor es de tipo rotativo y funciona con corriente continua.

2.21 Sensores.

Estos se encargan de recibir una señal física y transformarla en una eléctrica que sea capaz de entender el microcontrolador y de esta manera activar el sistema actuador y generar el movimiento deseado.

2.21.1. Módulo de reconocimiento de voz V3.

Este módulo es capaz de reconocer comandos por voz con una duración de 1500ms es decir entre dos a tres palabras, tiene una precisión del 99% el cual mediante un micrófono incorporado transforma el sonido en una señal eléctrica la cual es leída por el microcontrolador y dar una orden al actuador.

Se eligió este sensor por las características que presenta y su costo, considerando que tendremos una versatilidad en su funcionalidad y comodidad para el usuario.



Ilustración 17-2: Módulo de voz V3.

Fuente: (SanDoRobotics)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Antropometría de la mano y parámetros de diseño.

3.2. Antropometría de la mano.

Para realizar un diseño de prótesis lo más real y adecuado para la población ecuatoriana se estudiaron medidas antropométricas de la misma. Este estudio se realizó en jóvenes de la escuela superior politécnica de Chimborazo en Riobamba Ecuador todos ellos masculinos. La tabla a continuación muestra los valores promedios reportados y que servirán como base para el diseño de la prótesis.

Tabla 1-3: Medidas generales de la mano.

Parámetros	Valores reportados
Largo de la mano	194.61 mm
Longitud de la palma de mano	105.41 mm
Anchura de la mano sin pulgar	96.65 mm
Anchura de la mano con pulgar	105.72 mm

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Las dimensiones de las falanges de igual manera se obtuvieron de una población de la universidad como se indicó. Los valores reportados son entre 20-26 años mano izquierda que se presenta en la tabla 2-3. Con estos valores se busca construir el primer modelo de la prótesis.

Tabla 2-3: Longitud de las falanges de la mano.

Longitudes de falanges mm			
	Falange Proximal	Falange Medial	Falange Distal
Meñique	42±10	26±5	27±3
Anular	56±11	32±6	27±3
Medio	60±13	35±8	28±2
Índice	56±11	34±7	28±3
Pulgar	45±6	NA	38±4

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

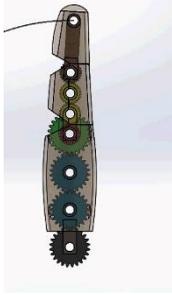
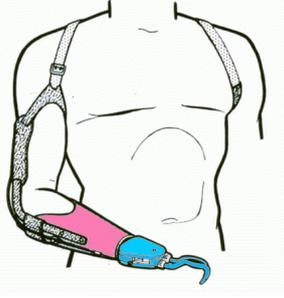
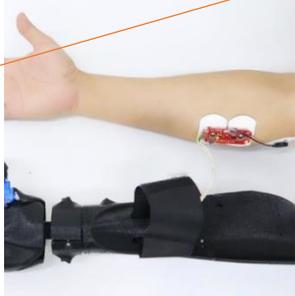
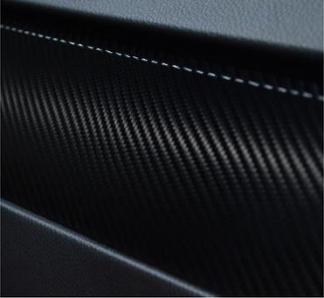
3.3. Especificaciones de la prótesis

La prótesis debe cumplir con ciertas especificaciones y requerimientos, para así satisfacer con las necesidades del cliente, cuya principal motivación sería una prótesis más que estética sea funcional.

3.3.1. Matriz morfológica

Se desarrollo una matriz morfológica mostrando las posibles combinaciones que se pueden realizar para tener una prótesis funcional con diferentes activaciones.

Tabla 3-3: Matriz morfológica.

Modelos			
Tipo			
Accionamiento			
Materiales			

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.3.2. Resultado de la matriz

Como resultado del análisis de la matriz se optó por un modelo mecánico con accionamiento por cuerdas, este modelo posee dedos individuales para una mejor sujeción con un accionamiento de tipo mecánico para lograr un agarre más preciso y se utiliza el material PLA por su relación costo y durabilidad

3.4. Matriz QFD

La matriz QFD (quality function deployment) o casa de la calidad permite a través de la voz del usuario y voz del ingeniero ayudan a determinar las especificaciones técnicas del producto, es un

método adoptado por la mayoría del mundo para considerar las necesidades y requisitos del cliente, para tener una idea de la calidad del producto final.

Para la generación de la matriz QFD se requiere, conocer la voz del cliente, en el cual se da a conocer las características y requerimientos del producto, estos criterios son traducidos por el ingeniero e interpretados técnicamente. Finalmente se evalúan los criterios técnicos para así determinar los que tienen mayor influencia en el diseño. (RIVA, 2002 pág. 177)

3.4.1. Voz del usuario (VOC)

La voz del usuario nos indica que características y funciones debe cumplir el producto final.

Para este caso la voz del usuario nos indica lo siguiente:

- Que sea de fácil colocación la prótesis
- Que no moleste o incomode a lo largo del día
- Que se pueda colocar con cualquier ropa
- Que tenga una buena sujeción y movimiento
- Que sea vistoso el modelo
- Que tenga un mantenimiento fácil
- Que no sea pesado
- De larga duración
- Que se pueda reparar rápido
- De costo barato

3.4.2. Voz del ingeniero

Una vez que se escucha la voz del usuario el ingeniero tendrá que transformar estas características y funciones en características vistas desde el punto de vista ingenieril

- De fácil instalación
- Que tenga una buena ergonomía
- De buena antropometría
- Que tenga un buen ajuste
- Movimiento continuo y sin trabas
- Ligero
- Buena calidad de los materiales
- Fácil de dar mantenimiento
- De costo accesible

3.4.3. Resultado de la matriz QFD

Los resultados se presentan en la figura 1-3 con los conocimientos obtenidos en la materia de diseño de sistemas y equipos mecánicos

A continuación, se muestra la figura que muestra el desarrollo del QFD

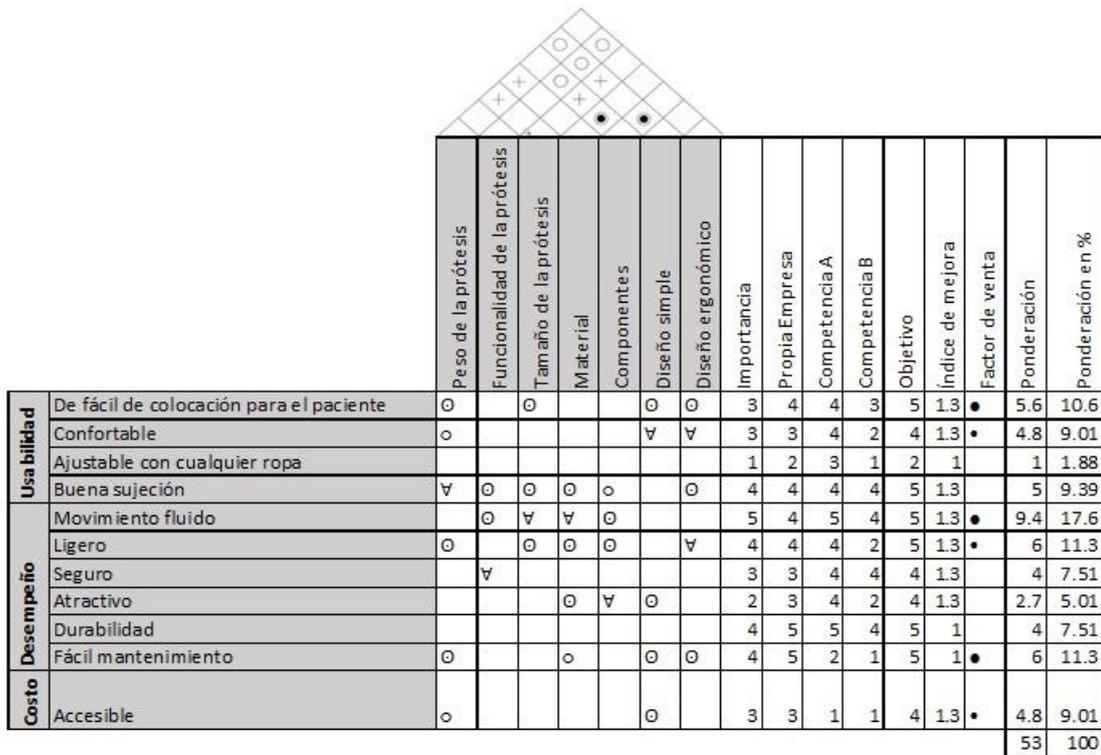


Ilustración 1-3: QFD de la prótesis transradial

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.4.4. Conclusiones de la matriz QFD

Para que tenga una buena sujeción se consideró el colocar en las yemas el otro tipo de material el TPU que nos da una superficie rugosa para evitar el deslizamiento.

Se buscará una forma lo más orgánica posible y que a su vez nos permita el desarrollo del movimiento deseado.

Al usar impresión 3D el material a utilizarse es mucho más liviano que otras opciones en el mercado además de asegurar una duración prolongada.

Para el mantenimiento el modelo se busca que sea de fácil montaje para acceder a los componentes y el remplazo es fácil para personas no especializadas

3.5. Análisis de funcionalidad

La función primaria de la prótesis es realizar el movimiento de apertura o cierre, mientras que las funciones secundarias serán las que permitan que se desarrolle este movimiento.

Una vez se determina el trabajo que realizara la prótesis, con sus respectivas funciones de carácter primario y secundario; se procede a desarrollar un diagrama de las funciones asignadas a los niveles 0 para función primaria y 1 para las funciones secundarias.

Para cada recuadro de los diagramas de funcionalidad se tendrá dos tipos de entradas y salidas: control y energía. Estas entradas estarán presentes de acuerdo con la función que requiera en la máquina.

En el caso de esta prótesis transradial el diagrama funcional de nivel 0 es el que se muestra en la figura que se presenta a continuación:



Ilustración 2-3: Función primaria de la prótesis

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Para la función primara las señales que ingresan son: la señal de energía que es energía eléctrica y la señal de control que es la puesta en marcha

En el nivel 1 aparecen detalladas las funciones que se requieren para alcanzar el nivel 0 para el funcionamiento de la prótesis.

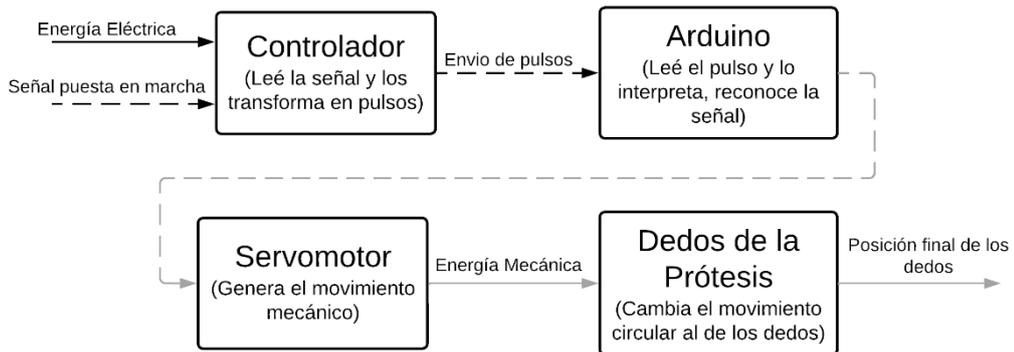


Ilustración 3-3: Descripción de funcionalidad

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.5.1. Definición de módulos

En la definición del módulo, los productos se dividen varios bloques de funciones. En un diseño que tiene en cuenta la distribución módulo, ayuda a reducir costos, es fácil de mantener y facilitará producción.

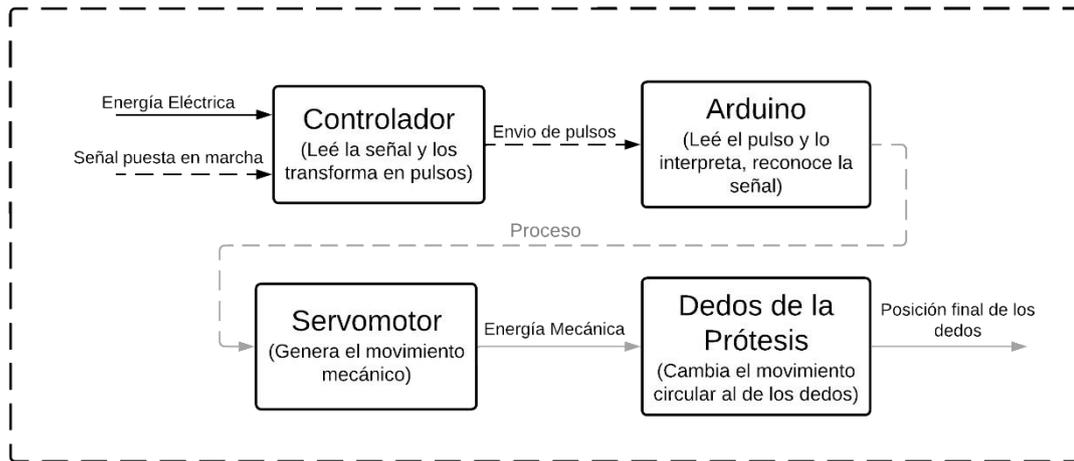


Ilustración 4-3: Estructura modular

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

En el diseño de la prótesis las funciones permiten que se desarrolle en un solo modulo todo el proceso, desde el momento de ingreso de la señal hasta la posición final de la prótesis, lo cual nos da el desarrollo buscado al inicio del proceso.

3.6. Diseño mecánico

La mano humana se puede modelar mecánicamente como un sistema de 20 a 26 grados de libertad (DOF, por sus siglas en inglés), (Jaworski & Karpiński, 2017), donde cada grado de libertad representa un tipo de movimiento de la articulación. Partiendo del trabajo realizado por (Cobos, Ferre, Sánchez Uran, Ortega, & Pena, 2008) y considerando el diseño más simple posible para la interfaz con el teclado, se consideraron articulaciones rotacionales de 1 DOF para cada una de las falanges y toda la zona metacarpiana se consideró fija. Con base en lo anterior se determinó un modelo mecánico de 15 grados de libertad, ver Ilustración 5-3. Donde L1, L2 y L3 representan las medidas de las distintas falanges que tendrá cada dedo, el resto de las medidas se fijaron como sigue: L4 = 104.61 mm, L5 = 93.51 mm, L6 = 83.51 mm, L7 = 45.50 mm, L8 = 35.75 mm, L9 = 26.66 mm, L10 = 35.94 mm, L11= 13.91 mm, L12= 11.34 mm, L13 =23.25 mm.

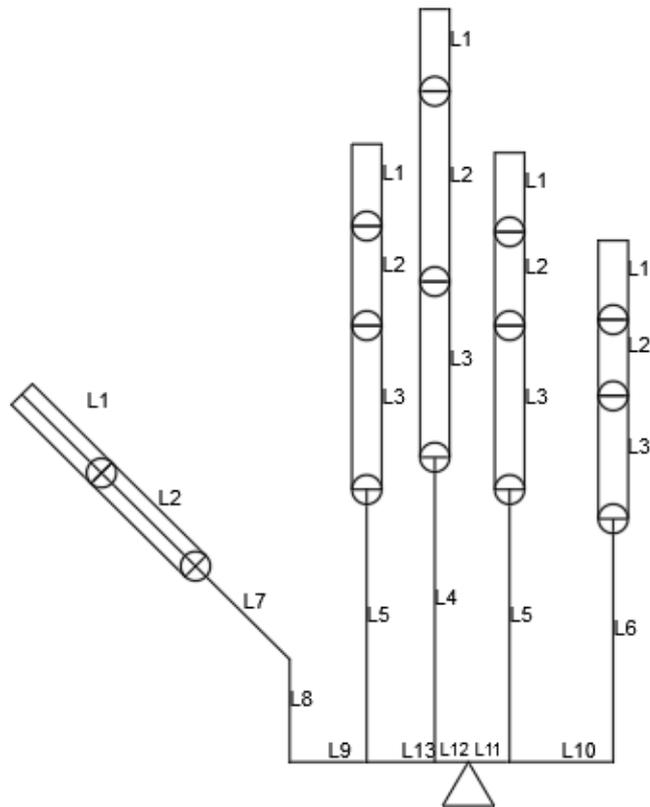


Ilustración 5-3: Mecanismo de la mano

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

El ángulo de inclinación de la articulación CMC (carpometacarpiana) del pulgar se propuso en 45° ya que es el ángulo promedio del dedo pulgar en reposo (Taboadela, 2007). Se consideran a los metacarpos de la mano como un elemento único que no tendrá movimiento por lo que se diseñó esta parte de la mano como una sola pieza sólida. Las dimensiones de la palma se toman a partir de los datos recolectados para largo y ancho.

El diseño de las falanges se realizó con un mecanismo intermedio entre ellas como se va a imprimir en 3D se va a utilizar TPU para los que denominaremos mecanismo de posición original que es los ligamentos y se encargan de colocar la pieza en su posición original. Además, en las falanges en la parte interna se va a remplazar las ultimas capas con este material para que se conseguir una mejor adhesión y se puedan sujetar materiales que tienden a resbalarse como el vidrio

3.7. Mecanismo de transmisión de movimiento

En la mano lo que genera la flexión o extensión de los dedos no es una parte del dedo si no son los músculos ubicados en el antebrazo y es por los tendones que se transmite el movimiento a los dedos. En el estado del arte, los métodos de transmisión de movimiento más comunes, así como sus principales ventajas y desventajas son:

Transmisión de movimiento lineal por barras: Son precisos, económicos, control de velocidad de desplazamiento con respecto al punto de entrada. Sin embargo, el diseño del mecanismo es

complejo, el torque se reduce en el punto final, la resistencia de eslabones se compromete debido a la longitud de este.

Actuadores en cada articulación: Aunque se puede alcanzar una precisión en el control, una capacidad de imitar los movimientos de la mano y una alta velocidad, estos logros también implican desventajas como el aumento de peso, mayores costos, mayor complejidad en el control y un mayor consumo de energía.

Transmisión de movimiento lineal por poleas fijas: Estos sistemas utilizan solamente un actuador, lo que se traduce en una reducción de costos, peso y complejidad, y un aumento en el torque del elemento terminal en comparación con el inicial. También son fáciles de controlar. Sin embargo, presentan algunas desventajas, como una reducción en el rango de movimiento, la posibilidad de que el sistema de transmisión se rompa fácilmente y una menor precisión.

Considerando la aplicación de la prótesis propuesta se decidió como mejor método de transmisión por polea por varias razones como evitar una complejidad de diseño, evitar el aumento absurdo de costos y que sea fácil de controlar con la voz. Se diseñó un sistema de guía por medio de canales dentro de la estructura de la prótesis como se muestra en la ilustración 6-3.

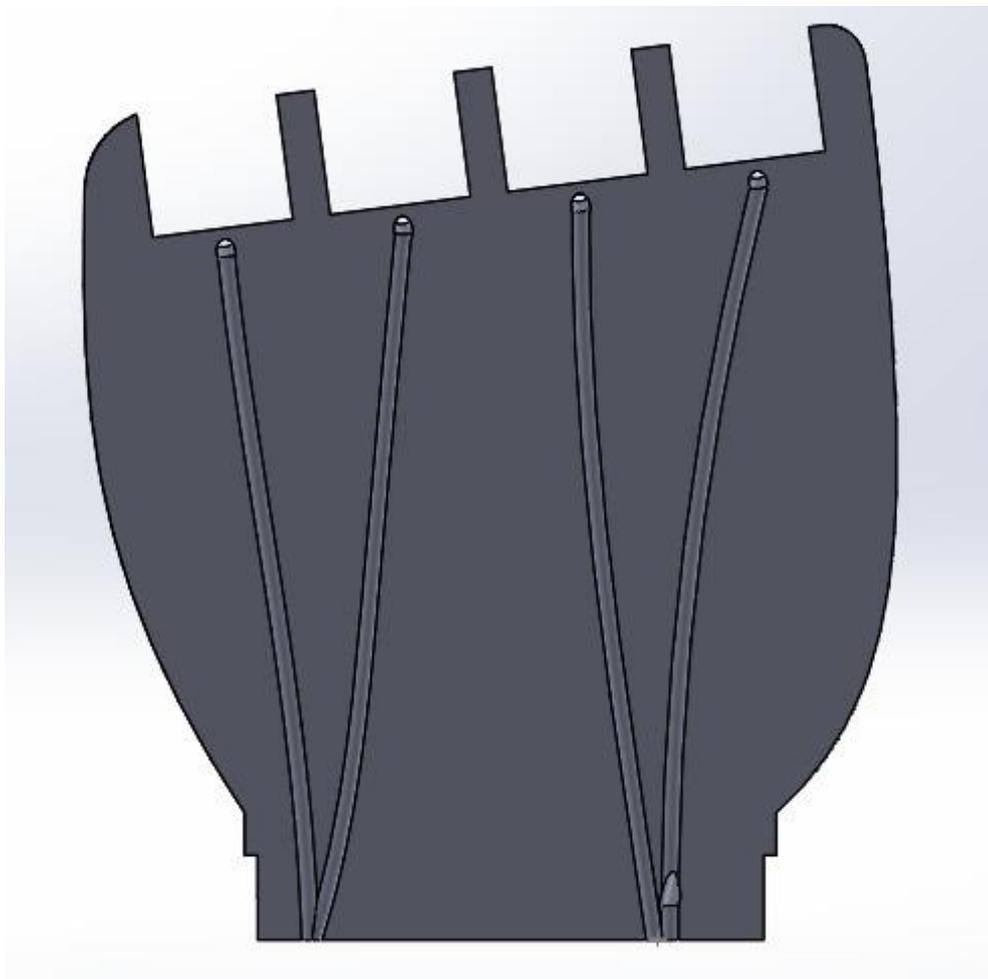


Ilustración 6-3: Representación de la vista frontal de la palma.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Se plantea un solo actuador en este caso un servo además de un hilo de nailon de 2 mm de grosor y una resistencia de 200 kg y una duración garantizada de 5 años.

3.7.1. Simulación del modelo

En el siguiente apartado a partir del modelado en SolidWorks se desarrolló un análisis de fuerzas en el software ANSYS para verificar cuanto desplazamiento tendrá el dedo.

3.7.1.1. Dedo pulgar

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo pulgar.

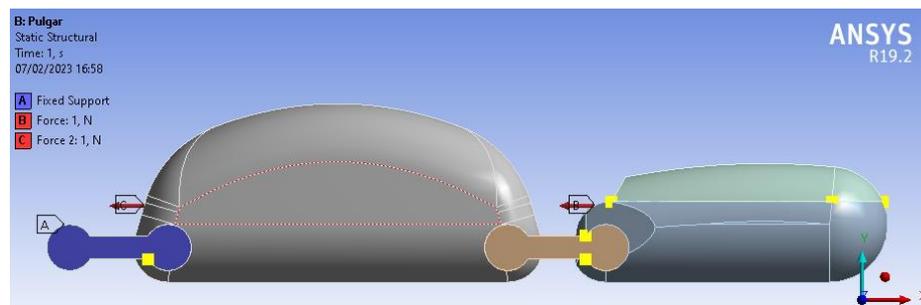


Ilustración 7-3: Análisis en ANSYS del dedo pulgar.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.7.1.2. Dedo índice

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo índice.

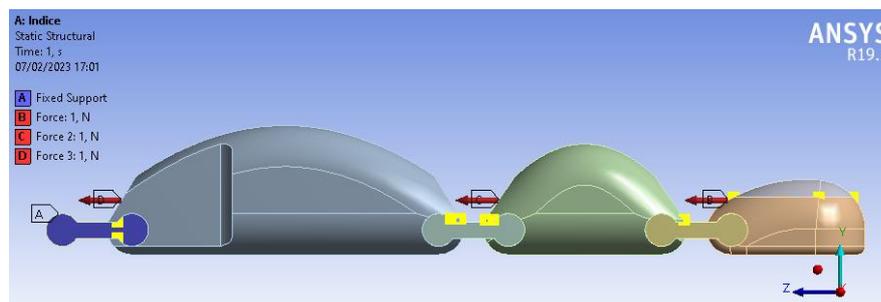


Ilustración 8-3: Análisis en ANSYS del dedo índice

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.7.1.3. Dedo medio

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo medio.

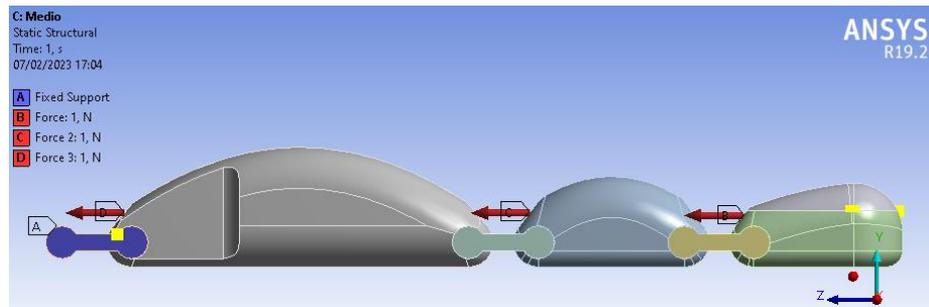


Ilustración 9-3: Análisis en ANSYS del dedo medio.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.7.1.4. *Dedo anular*

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo anular.

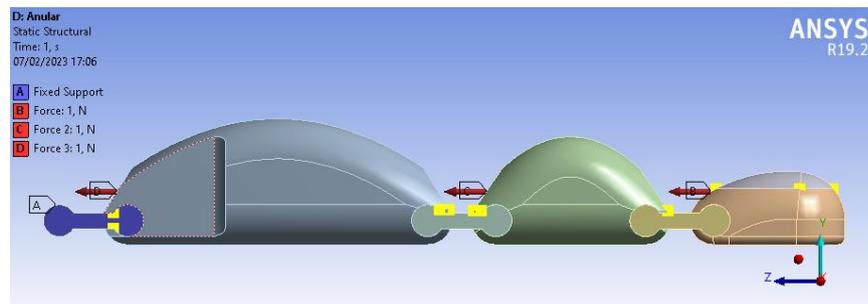


Ilustración 10-3: Análisis en ANSYS del dedo anular.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.7.1.5. *Dedo meñique*

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo meñique.

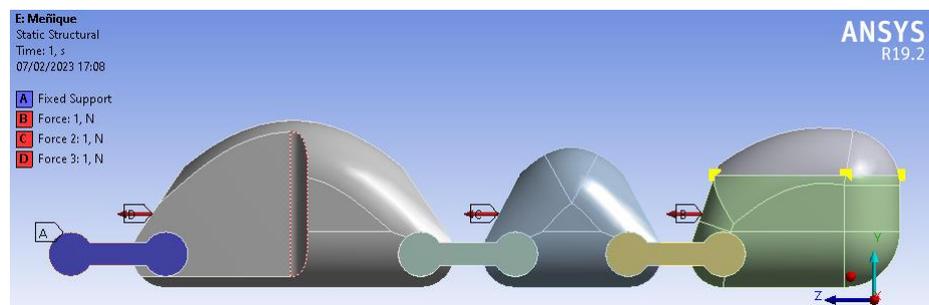


Ilustración 11-3: Análisis en ANSYS del dedo meñique.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.7.2. *Mallado del modelo*

En el siguiente apartado a partir del modelado en SolidWorks se desarrolló un análisis de fuerzas en el software ANSYS para verificar cuanto desplazamiento tendrá el dedo.

3.7.2.1. Dedo pulgar

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo pulgar.

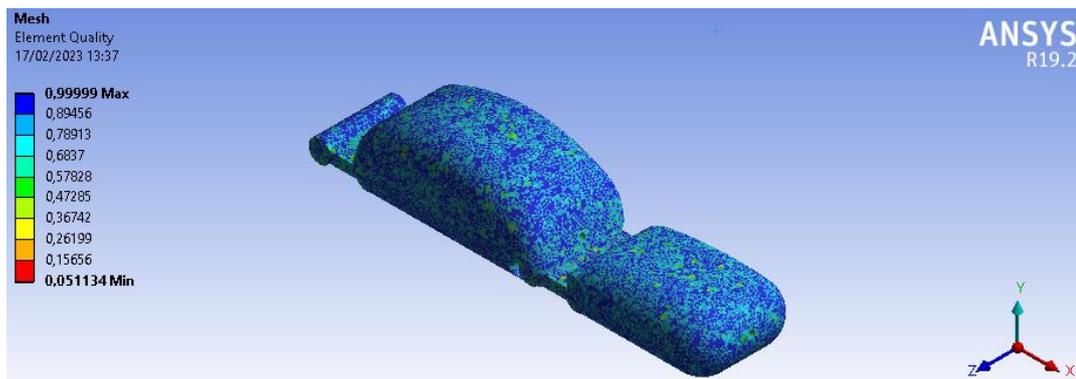


Ilustración 12-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo pulgar.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.7.2.2. Dedo índice

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo índice.

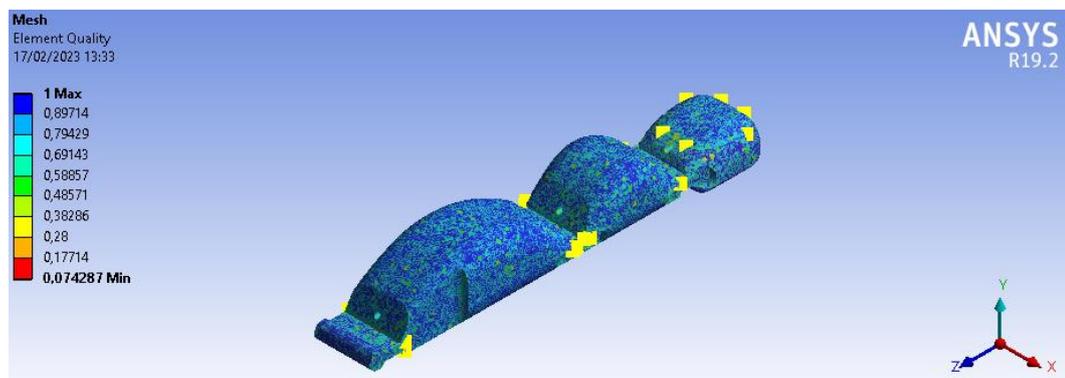


Ilustración 13-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo índice.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.7.2.3. Dedo medio

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo medio.

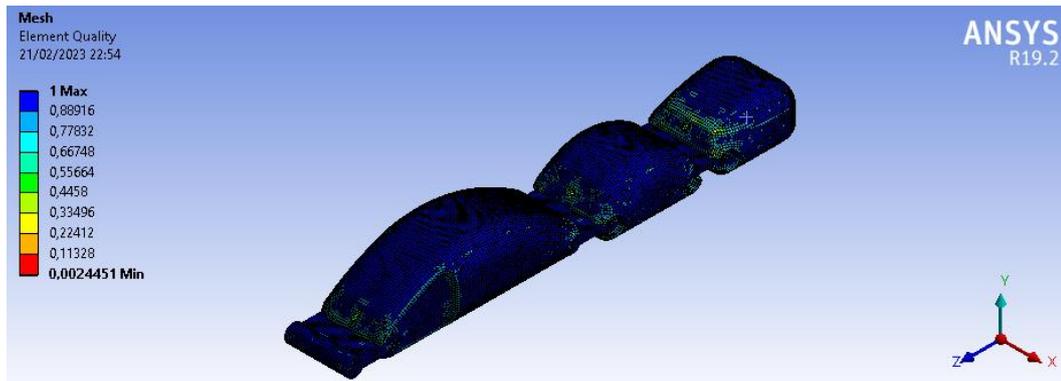


Ilustración 14-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo medio.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.7.2.4. *Dedo anular*

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo anular.

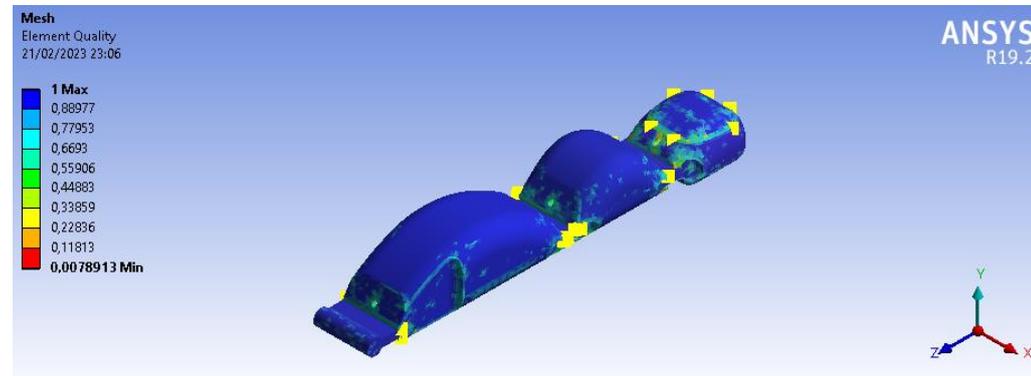


Ilustración 15-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo anular.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.7.2.5. *Dedo meñique*

Se presenta el modelado y las fuerzas aplicadas en el software ANSYS antes de iniciar la simulación para ver el desplazamiento del dedo meñique.

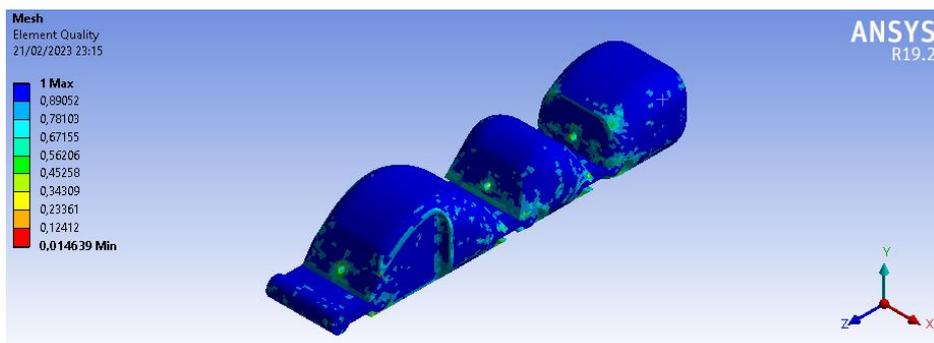


Ilustración 16-3: Análisis del mallado en ANSYS del dedo meñique.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.8. Selección de los actuadores

Como principal actuador se decidió utilizar un servomotor que recoja el nylon para generar el movimiento de agarre a la prótesis, para esto se usa dos servomotores de 25kg.cm, por que a diferencia de una mano común y corriente no podemos modificar la manera de colocar los dedos, para conseguir que este no se resbale por lo que se opta por cambiar las yemas de los dedos por un material que ayude con la fricción pero se debe aplicar una fuerza lo suficientemente fuerte como para que nos de fuerza de sujeción pero no tan fuerte como para destruir un huevo o un vaso, no necesariamente de plástico se podría decir que puede ser uno de poliuretano por lo que se busca un precisión en este aspecto.

3.9. Parámetros de la funcionalidad

3.9.1. Parte electrónica

3.9.1.1. Servomotor

A continuación, se detalla en la tabla 3-3 las diferentes características del servomotor que se va a utilizar.

Tabla 4-3: Características del servomotor.

MG996R	
Trabajo	13kg.cm
Voltaje	4.8-7.2 V
Velocidad de operación	4.8 v sin carga 0.2s/60° 6v sin carga 0.16s/60°
Peso	55 gr
Angulo de trabajo	0-180 grados
Pulso por ciclo	20 ms
Temperatura de operación	-30°-60°

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.9.1.2. Módulo de voz

Se selecciono el módulo de voz de acuerdo con las características y funcionalidad que se muestra a continuación en la tabla 4-3.

Tabla 5-3: Características del sensor de voz.

V3	
Máximo de comandos	80
Duración del comando	1500 ms
Comandos al mismo tiempo	7
Precisión	99% (Sin ruido)- 90% (con ruido)
Voltaje de operación	4.5-5 V
Corriente	40 mA

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.9.1.3. Arduino

Las características que se presentan a continuación en la tabla fueron las necesarias para el tipo de control de la prótesis.

Tabla 6-3: Características del arduino.

Arduino uno	
Microcontrolador	At Mega 328P/16bits
Pines de entrada y de salida	14 (5 V/ 40 mA)
Pines Analógicos	6 (5 V/ 40 mA)
Alimentación salida	3.3-5 V
Alimentación de entrada	9 V por pin
Jack de alimentación	7-12 V
Pines de comunicación serial	2
Puerto USB	5 V

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.9.2. Parte mecánica.

3.9.2.1. Hilo Nailon.

Se escogió el hilo nailon de 0.6 mm por las características físicas que presentan en la tabla necesarios para los parámetros de aplicación.

Tabla 7-3: Características del hilo nylon.

Fluorol Carbon Samuline	
Diámetro	0.6
Largo	50 mm
Resistencia	18.9 kg
Material	Fluoro carbono

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.9.2.2. Material rígido de impresión

Las características necesarias para el filamento que se van a usar están en la tabla 7-3.

Tabla 8-3: Características del PLA

Filamento PLA	
Temperatura de impresión	180-220 °
Diámetro	1.75mm/3.0mm
Peso	1 kg
Peso neto	1.35 kg
Tolerancia	± 0.2 mm

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.9.2.3. Material flexible de impresión

Las características para el material flexible se muestran en la tabla 8-3.

Tabla 9-3: Características del TPU.

Filamento TPU	
Temperatura de impresión	200-220 °
Diámetro	1.75mm
Peso	1 kg
Peso neto	1.35 kg
Tolerancia	± 0.2 mm

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.10. Parámetros generales

3.10.1. Impresora 3D

Para el proceso de impresión se utilizó la impresora Ender 3 Pro la cual tiene una mejora en el extrusor y todos sus parámetros se detallan en la tabla 9-3.

Tabla 10-3: Características de la impresora 3D.

Ender 3 Pro	
Volumen máximo de impresión	220x220x250
Nozzle o boquilla	0.4 mm
Velocidad máx. De impresión	180 mm/s
Resolución de capa	0.1-0.4 mm
Extrusor	MK-10

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.11. Parámetros de trabajo de la mano

Para replicar el movimiento natural de apertura y cierre de la mano se han considerado los siguientes datos presentados en la tabla 10-3.

Tabla 11-3: Parámetros de trabajo.

Ángulos de trabajo	
Posición mano abierta	85°
Posición mano cerrada	5°
Posición de agarre vaso	50°
Posición de agarre cuchara	6°
Posición de agarre esfera	35°

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.12. Comandos

Para el correcto funcionamiento de la prótesis se detallan los comandos necesarios que se van a utilizar posteriormente en la tabla 11-3.

Tabla 12-3: Lista de comandos.

Objeto	Comando	Acción
Vaso	Vaso	Se cierra la mano a 50°
Lápiz	Lápiz	Se cierra la mano a 35°
Cuchara	Cuchara	Se cierra la mano a 6°
Ninguno	Abrir	Se abre la mano a la posición inicial a 85°
Ninguno	Cerrar	Se cierra la mano al máximo
Mano	Saludo	Se cierra la mano después de unos
Ninguno	Agarre	Se cierra la mano en forma de gancho a 45°
General	Uno	Se cierra la mano a 10°
General	Dos	Se cierra la mano a 20°
General	Tres	Se cierra la mano a 30°
General	Cuatro	Se cierra la mano a 40°
General	Cinco	Se cierra la mano a 50°
General	Seis	Se cierra la mano a 60°
General	Siete	Se cierra la mano a 70°
General	Ocho	Se cierra la mano a 80°

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.13. Diseño CAD prótesis.

Para el modelo CAD se establece una primera propuesta en la cual se tiene a consideración las dimensiones previamente tomadas, al ser un primer modelo se tiene en cuenta netamente las dimensiones generales y no tomando la parte estética.

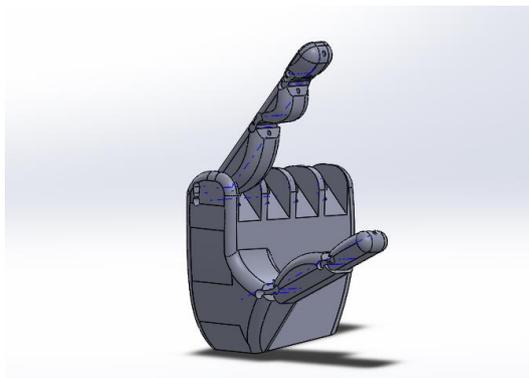


Ilustración 17-3: Primer prototipo.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Realizado el ensamble previo en SolidWorks se puede observar las interferencias y las correcciones necesarias para poder tener un movimiento.

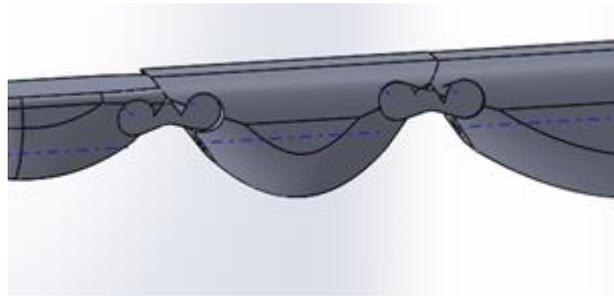


Ilustración 18-3: Interferencias del primer prototipo.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Para poder comprobar el modelo se imprime en un prototipado rápido la palma de la mano a un 5% de relleno en cual se puede verificar las distancias de manera física y así se puede realizar correcciones de una manera más fácil que al solo tener el dibujo en SolidWorks



Ilustración 19-3: Prototipado rápido de la palma.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Teniendo todas las consideraciones antes planteadas se corrige las articulaciones y los bordes que presentaron un contacto entre si provocando una interrupción en el movimiento.

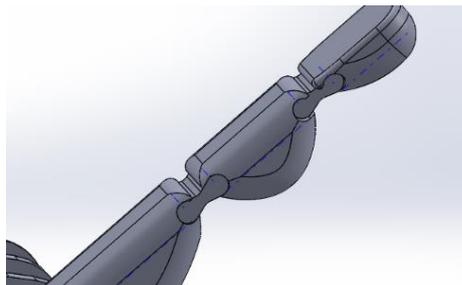


Ilustración 20-3: Correcciones del modelo.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.14. Diseño del mecanismo

3.14.1. Planteamiento de las ecuaciones de movimiento

3.14.1.1. Dedo pulgar

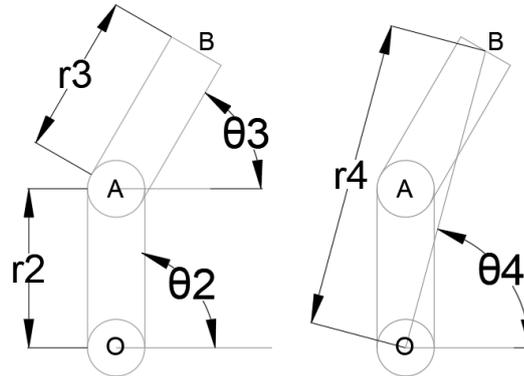


Ilustración 21-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo pulgar.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Ecuación de cierre del mecanismo

$$r_{OA}e^{j\theta_2} + r_{AB}e^{j\theta_3} = r_{OB}e^{j\theta_4}$$

3.14.1.2. Dedo índice

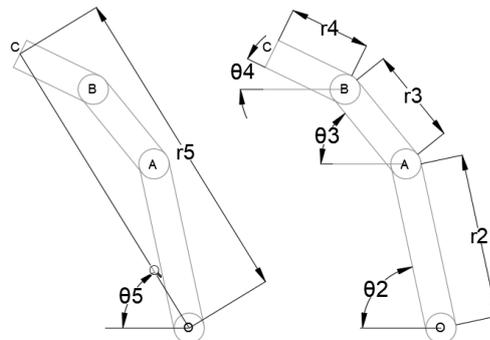


Ilustración 22-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo índice.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Ecuación de cierre del mecanismo

$$r_{OA}e^{j\theta_2} + r_{AB}e^{j\theta_3} + r_{OB}e^{j\theta_4} = r_{Oc}e^{j\theta_5}$$

3.14.1.3. Dedo medio

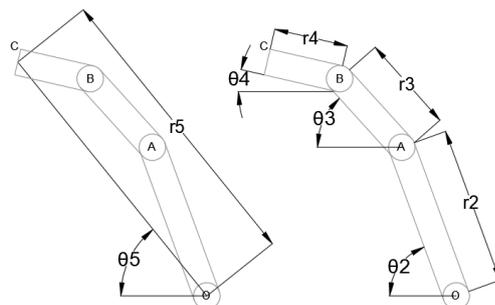


Ilustración 23-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo medio.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Ecuación de cierre del mecanismo

$$r_{OA}e^{j\theta_2} + r_{AB}e^{j\theta_3} + r_{OB}e^{j\theta_4} = r_{Oc}e^{j\theta_5}$$

3.14.1.4. Dedo anular

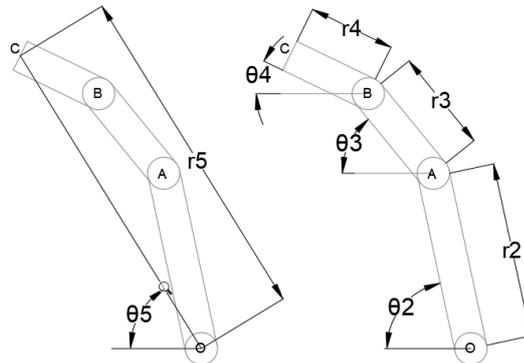


Ilustración 24-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo anular.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Ecuación de cierre del mecanismo

$$r_{OA}e^{j\theta_2} + r_{AB}e^{j\theta_3} + r_{OB}e^{j\theta_4} = r_{Oc}e^{j\theta_5}$$

3.14.1.5. Dedo meñique

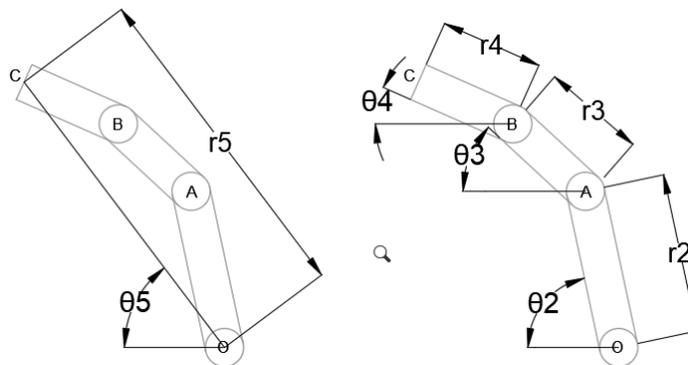


Ilustración 25-3: Representación de la vista lateral del mecanismo del dedo meñique.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Ecuación de cierre del mecanismo

$$r_{OA}e^{j\theta_2} + r_{AB}e^{j\theta_3} + r_{OB}e^{j\theta_4} = r_{Oc}e^{j\theta_5}$$

3.15. Cinemática directa

Se aplicó cinemática directa para encontrar los puntos finales de posición de los dedos asumiendo los ángulos con los que constarían las falanges y con la longitud de estas se puede hallar la posición en la que se encontraría el dedo.

Tabla 13-3: Resultados de la cinemática directa.

Dedo	Datos						Resultados		
	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)	φ_1 (°)	φ_2 (°)	φ_3 (°)	X (mm)	Y (mm)	Θ (°)
Pulgar	45	38	-	90	65	-	34.44	61.06	25
Índice	56	34	28	75	65	20	64.83	95.42	5
Medio	60	35	28	80	60	15	71.20	98.26	5
Anular	56	32	27	68	55	20	66.70	93	5
Meñique	42	26	27	88	23	12	58.62	77.15	5

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.16. Cinemática inversa

Al aplicar la cinemática inversa con los datos obtenidos en la tabla anterior que se volverían con la longitud y la posición se podrá hallar los ángulos a los que se encuentra cada falange se consigue los siguientes resultados presentados en la tabla 14-3.

Tabla 14-3: Resultados de la cinemática inversa.

Dedo	Datos						Resultados		
	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)	X (mm)	Y (mm)	θ (°)	φ_1 (°)	φ_2 (°)	φ_3 (°)
Pulgar	45	38	-	34.44	61.06	25	65	31.15	-
Índice	56	34	28	64.83	95.42	5	42	-15.36	-30.01
Medio	60	35	28	71.20	98.26	5	41.99	-15.38	-30.02
Anular	56	32	27	66.70	93	5	41.99	-15.37	-30.02
Meñique	42	26	27	58.62	77.15	5	41.99	-15.36	-30.00

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.17. Análisis de los dedos en Matlab

Mediante Matlab creamos un código que nos permitiera realizar el análisis del mecanismo resultante con la consideración para mayor facilidad de análisis que las últimas falanges están fijas permitiéndonos analizar la trayectoria, velocidad y aceleración de cada uno de los dedos como por ejemplo el dedo pulgar cuyos resultados se presentan a continuación

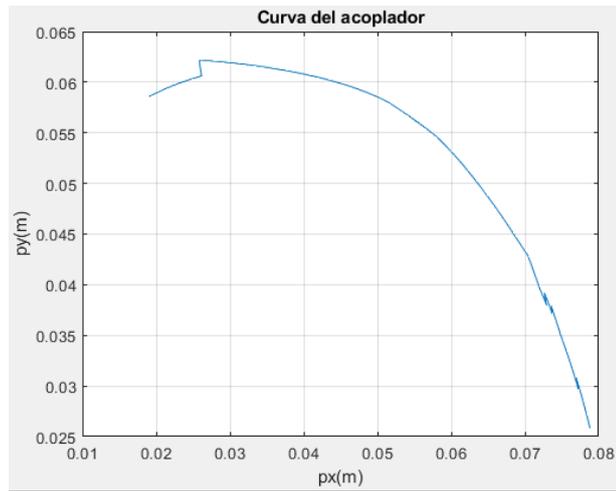


Ilustración 26-3: Curva del dedo pulgar

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

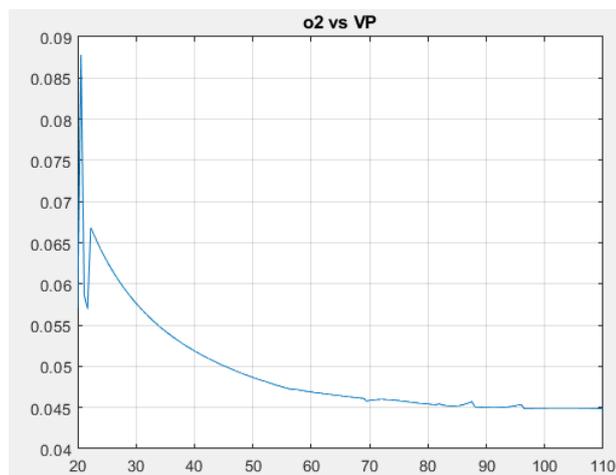


Ilustración 27-3: Curva Posición vs Velocidad

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

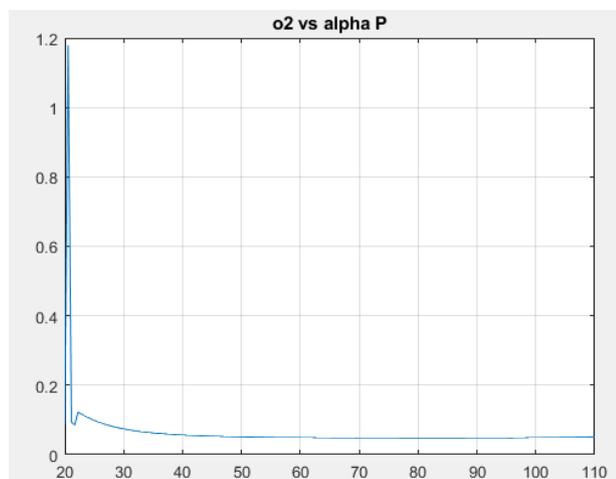


Ilustración 28-3: Curva Posición vs Aceleración

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Y al final se puede resumir en esta tabla resumen donde asumimos que la velocidad y aceleración será la misma para todos los dedos menos para el pulgar.

Tabla 15-3: Tabla resumen de velocidades y aceleraciones de los dedos

	Velocidad (mm/s)	Aceleración (mm/s ²)
Pulgar	0.57	1.179
Dedos	0.62	0.35

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.18. Selección de los materiales

Para la selección del material se busca un material que cumpla con ser resistente pero ligero y además de tener un costo accesible para la construcción de la prótesis y además nos permita la mejor funcionalidad de esta.

3.18.1. Selección técnica del material

El material debe tener una resistencia mecánica similar al de las prótesis estéticas, no debe ser contaminante al contacto y además de ligero; a continuación, se detallan los diferentes materiales disponibles para impresión 3D con la técnica de impresión FFF (Fusión Filament Fabrication).

Tabla 16-3: Comparación técnica de los materiales.

Material	Propiedades	Aplicaciones	Funcionalidad
ABS	Fuerte Ligero Alta Resolución Resistente Flexible Resistencia al calor	Modelos arquitectónicos Modelos conceptuales Bricolaje Fabricación de piezas en general	No se utilizó porque las temperaturas de operación son mayores y tiempos de secado altos.
PLA	Biodegradable en plantas de tratamiento Inocuo para los alimentos	Modelos conceptuales Bricolaje Modelos funcionales Fabricación de piezas funcionales	Material elegido por sus características y por su temperatura de operación
Nylon	Superficie fuerte y lisa Resistente a productos químicos Algo flexible Resistente al calor	Modelos conceptuales Modelos funcionales Aplicaciones médicas Herramientas Artes visuales	Funcional pero no es tan resistente en comparación a los otros
PEEK	Biocompatible Altamente duradero	Industria aeroespacial Industria automotriz	Por el tipo de aplicaciones que se tiene

	Resistente al calor y al impacto	Industria química Prótesis médicas	se ve que es un material muy costoso.
PET	Superficie fuerte para alimentos Seguro para alimentos Flexible Liso	Bricolaje Modelos funcionales Industria de alimentos	Temperatura de operación mayor no se encuentra comercial en el país

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.18.2. Selección por software CES Edupack.

Después de haber planteado en el literal anterior un análisis de los posibles materiales a utilizar para la impresión de la prótesis, en base a los módulos de Young y que debe constituir un material ligero para no molestar en el brazo de la persona que lo utilice. Con esto se procedió a colocar las características con una referencia de material como el acero.

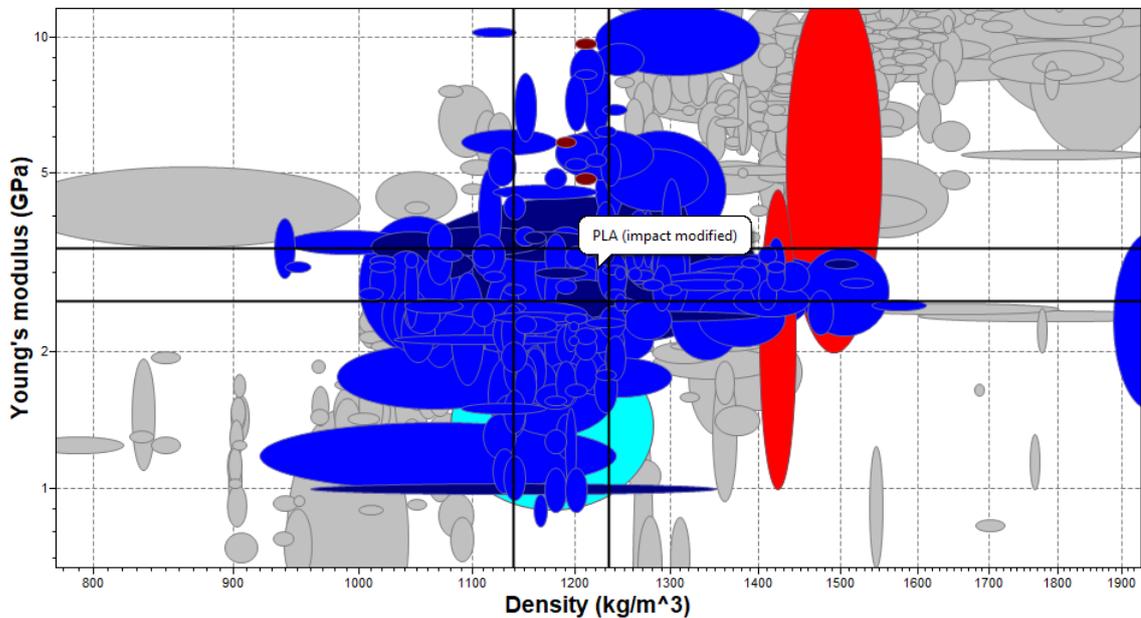


Ilustración 29-3: Selección de material en CES Edupack

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Contraponiendo las dos características obtenemos el resultado que de igual manera el PLA cumple con las especificaciones necesarias para ocuparse en este proyecto.

3.19. Parámetros de impresión

3.19.1. PLA

Tabla 17-3: Parámetros de impresión del PLA.

Medidas en cura	
Altura de capa	0.2 mm

Grosor de la pared	0.8 mm
Recuento de líneas de pared	0.2 mm
Expansión horizontal	-0.1
Grosor superior/inferior	0.8
Capas superiores/inferiores	5
Densidad de relleno	20%
Patrón de relleno	Triangulo
Temperatura de impresión	215°
Temperatura de la placa	60°
Tipo de adherencia a la placa	Falda (3)
Densidad del soporte	5%
Velocidad de impresión	50 mm/s

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.19.2. TPU

Tabla 18-3: Parámetros de impresión del TPU

Medidas en cura	
Altura de capa	0.2 mm
Grosor de la pared	0.8 mm
Recuento de líneas de pared	0.2 mm
Expansión horizontal	-0.1
Grosor superior/inferior	0.9
Capas superiores/inferiores	5
Densidad de relleno	0%
Patrón de relleno	Ninguno
Temperatura de impresión	230°
Temperatura de la placa	20°
Tipo de adherencia a la placa	Ninguno
Densidad del soporte	0%
Velocidad de impresión	20 mm/s

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.20. Modelado del primer prototipo

Considerando todos los modelos hechos se logró llegar a un modelo que sería netamente mecánico sin considerar los detalles y la parte estética, tomando el mecanismo resuelto y la funcionalidad.

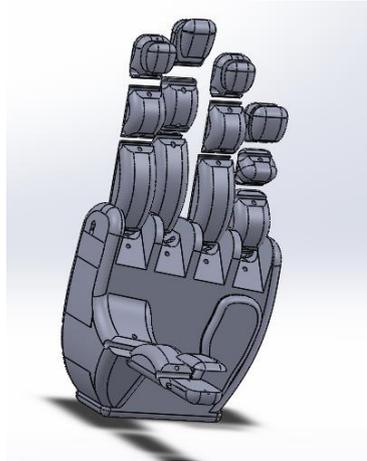


Ilustración 30-3: Prototipo funcional sin estilizar.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Después de realizar diferentes modelos ya realizados se tenía una falla que al ser el PLA el material usado para impresión el actuador no era suficiente para poder lograr un agarre que se mantenga ya que la rugosidad que presenta no es tan alta para lo cual se decidió realizar en la parte de las yemas un corte y este sería realizado con TPU el material usado para las articulaciones ya que presenta una mayor elasticidad que ayudaría a tener un mejor agarre.

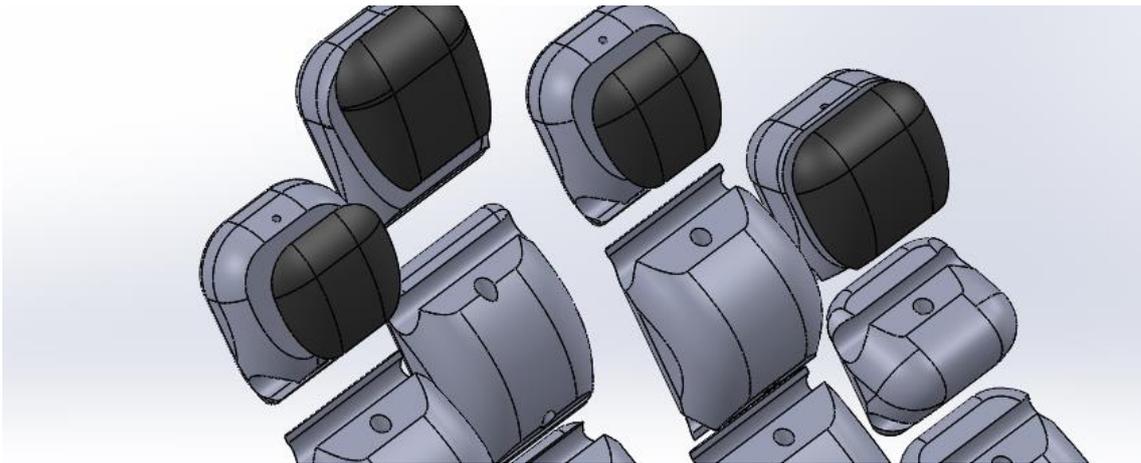


Ilustración 31-3: Vista general de yemas con TPU.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.21. Prototipo impreso

Tomando en cuenta el análisis cinemático directo, inverso, mecanismo, el análisis en ANSYS se llegó a un modelo mecánico, con este pretende partir del mismo para llegar a un modelo más orgánico y estilizado en este caso ya que se verificó toda su funcionalidad

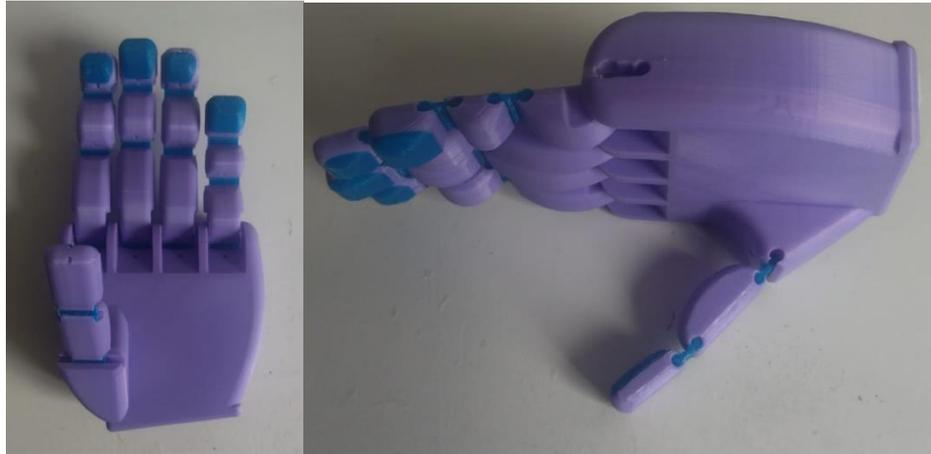


Ilustración 32-3: Modelo mecánico de la mano.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

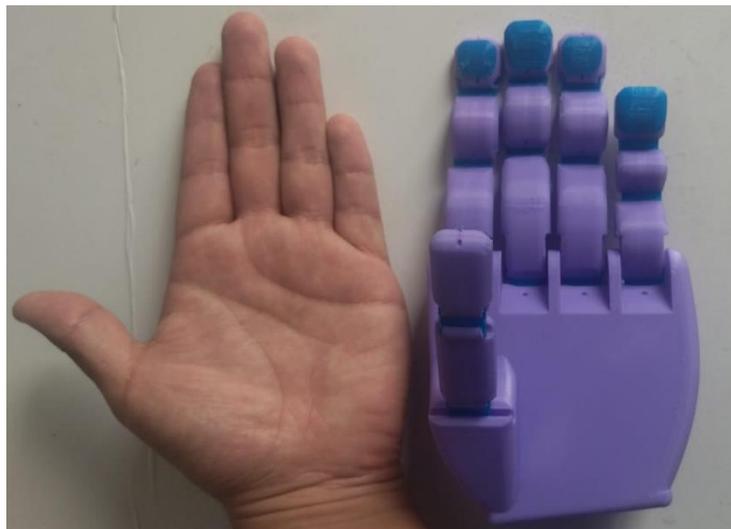


Ilustración 33-3: Comparativa entre la mano y el modelo mecánico.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.22. Circuito

3.22.1. Detalle del sistema

Las conexiones presentes en la ilustración 30-3, partiendo desde el microcontrolador (Arduino Uno) en los pines 2 y 3 se conecta la comunicación RX y TX del módulo de reconocimiento de voz el cual tiene una alimentación de 5v que se toma desde el Arduino, para la conexión al micrófono se reemplaza el que viene de fábrica por uno de corbatín con mejor definición, los actuadores (servomotores) se conectan a los pines 5 y 6 respectivamente sin importar el orden ya que los 2 realizan el mismo movimiento, para poder compensar la alimentación de los servomotores que realizan mucha fuerza y su consumo de corriente es alto se usa una placa de carga para baterías 18650 en este caso de 6500 miliamperios hora que son capaces de suministrar una salida de 5 voltios y 3 amperios con la ventaja que se puede recargar con un cargador tipo c y se puede observar el nivel de carga de las baterías.

3.22.2. Diagrama del circuito

Se representará las conexiones que componen al circuito de manera que se puede identificar los componentes y como se conectan para el correcto funcionamiento de estos.

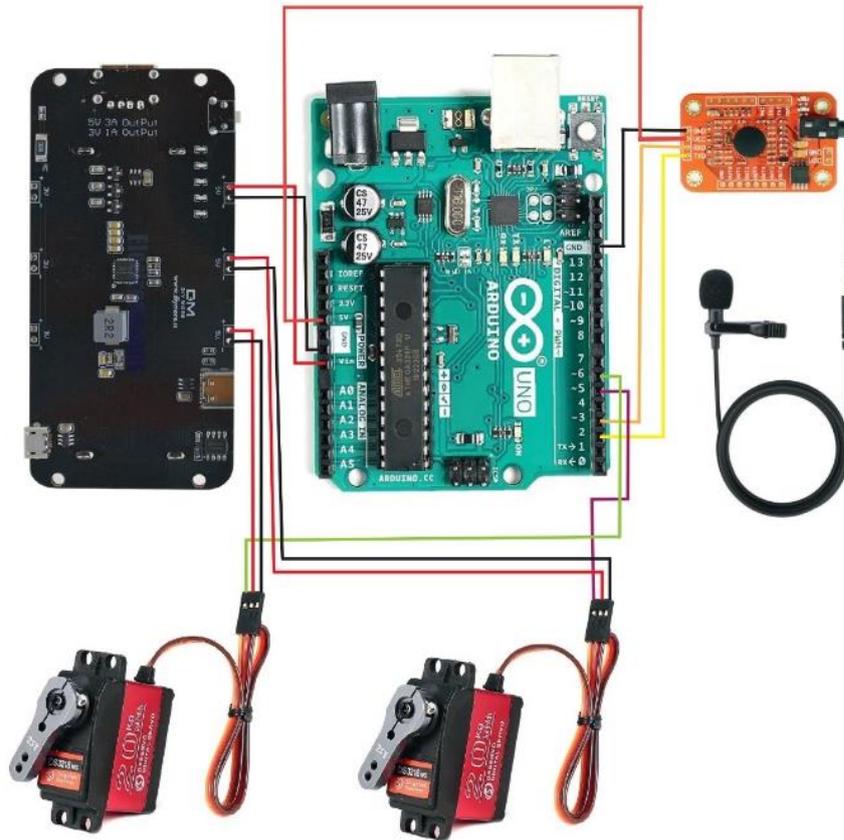


Ilustración 34-3: Diagrama del circuito.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.23. Construcción

Durante el proceso de construcción, ensamble y pruebas de la prótesis se ocuparon los siguientes máquinas y herramientas

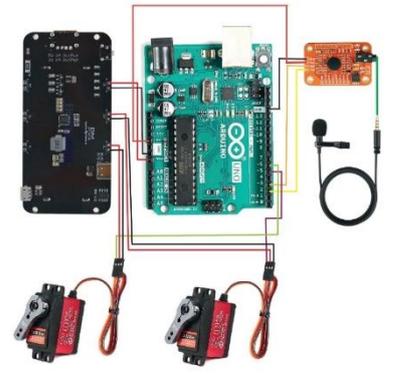
- Impresora 3D
- Computadora
- Cortadora de cables
- SolidWorks
- Arduino IDE

3.24. Componentes de la prótesis y tecnología de construcción.

Para el ensamble de la prótesis se sigue una secuencia de procesos, para que se pueda optimizar el uso de los recursos y minimizar el tiempo de construcción.

La prótesis se compone de 2 sistemas como lo indica la tabla 18-3.

Tabla 19-3: Esquemas de los sistemas de la prótesis.

Sistema	Esquema
Sistema motriz	
Sistema electrónico	

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.25. Programación

3.25.1. Procedimiento para programar el módulo de voz.

El procedimiento para la grabar el audio de los siete comandos de voz es el que se detalla a continuación.

- a) Descargarse la librería del módulo Elechouse que nos proporciona un código para grabar los audios a usar.
- b) Abrir el ejemplo que incluye la librería “vr_sample_train” y cargarlo al Arduino
- c) Ejecutar el monitor serial del Arduino y cargar los comandos que vamos a usar para accionarlos por la voz usando el comando “sigtrain” acompañado del número del comando partiendo desde el cero y el nombre de la acción damos enter saldrá el siguiente recuadro

```

record      record / record (r) (r)... record / record 0 /9      Check record train status
vr          vr          vr          Check recognizer status
getsig     getsig (r)          getsig 0          Get signature of record (r)
sigtrain   sigtrain (r) (sig) sigtrain 0 ZERO   Train one record(r) with signature(sig)
settings   settings          settings          Check current system settings
help       help          help          print this message
-----
sigtrain 0 vaso
-----
Record: 0      Speak now
Record: 0      Speak again
Record: 0      Cann't matched
Record: 0      Speak now
Record: 0      Speak again
Record: 0      Success
Success: 1
Record 0      Trained
SIG: vaso
-----

```

Ilustración 35-3: Proceso de grabación de voz.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Nota: para grabar se debe observar en el módulo fijo lo siguiente

- LED naranja parpadea rápido: Prepárate.
- LED rojo fijo: Grabar comando primera vez.
- LED naranja parpadea lento: Prepárate para la segunda grabación.
- LED rojo fijo: Grabar comando segunda vez.
- LED rojo y naranja parpadeando a la vez: Los comandos coinciden y se guardan.

Se carga las siguientes acciones

sigtrain 0 vaso

sigtrain 1 lápiz

sigtrain 2 cuchara

sigtrain 3 abrir

sigtrain 4 cerrar

sigtrain 5 saludo

sigtrain 6 gancho

- d) Después para cargar las voces utilizaremos el comando “load 0 1 2 3 4 5 6”. Si se graban correctamente veremos un mensaje indicándonoslo en el monitor serial.

```
load 0 1 2 3 4 5 6
-----
Load success: 7
Record 0      Loaded
Record 1      Loaded
Record 2      Loaded
Record 3      Loaded
Record 4      Loaded
Record 5      Loaded
Record 6      Loaded
-----
```

Ilustración 36-3: Carga de los comandos.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

- e) Se debe verificar que este grabado las acciones mediante el comando “vr”

```
vr
-----
All voice records in recognizer: 7
Valid voice records in recognizer: 7
VR is not in group mode.
VR Index      Record      Comment
0             0             Valid
1             1             Valid
2             2             Valid
3             3             Valid
4             4             Valid
5             5             Valid
6             6             Valid
-----
```

Ilustración 37-3: Verificación de carga de las acciones.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.26. Proceso de ensamble

3.26.1. Elementos para la construcción

En la tabla 19-3 detalla a continuación que se tendrá los componentes necesarios para el ensamble de la prótesis y su respectivo material.

Tabla 20-3: Elementos para la construcción de la prótesis.

Sistema	Elemento	Cantidad	Material/modelo
Motriz	1° falange dedo pulgar	1	PLA
	2° falange dedo pulgar	1	PLA
	1° falange dedo índice	1	PLA

	2° falange dedo índice	1	PLA
	3° falange dedo índice	1	PLA
	1° falange dedo medio	1	PLA
	2° falange dedo medio	1	PLA
	3° falange dedo medio	1	PLA
	1° falange dedo anular	1	PLA
	2° falange dedo anular	1	PLA
	3° falange dedo anular	1	PLA
	1° falange dedo meñique	1	PLA
	2° falange dedo meñique	1	PLA
	3° falange dedo meñique	1	PLA
	Articulaciones	14	TPU
	Palma de mano	1	PLA
	Muñeca	1	PLA
	Yema pulgar	1	TPU
	Yema índice	1	TPU
	Yema medio	1	TPU
	Yema anular	1	TPU
	Yema meñique	1	TPU
	Hilo	1	Nylon
Electrónico	Circuito controlador	1	Diseño, selección

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.26.1.1. Construcción e impresión de la prótesis transradial

Tabla 21-3: Elementos y su proceso de construcción.

Sistemas	Elemento	N.º	Operaciones
Sistema motriz	Palma	1	Toma de medidas
		2	Dibujado CAD
		3	Impresión 3D
	1° Falange dedo pulgar	4	Toma de medidas
		5	Dibujado CAD
		6	Impresión 3D
	2° Falange dedo pulgar	7	Toma de medidas
		8	Dibujado CAD
		9	Impresión 3D
	1° Falange dedo índice	10	Toma de medidas

		11	Dibujado CAD
		12	Impresión 3D
	2º Falange dedo índice	13	Toma de medidas
		14	Dibujado CAD
		15	Impresión 3D
	3º Falange dedo índice	16	Toma de medidas
		17	Dibujado CAD
		18	Impresión 3D
	1º Falange dedo medio	19	Toma de medidas
		20	Dibujado CAD
		21	Impresión 3D
	2º Falange dedo medio	22	Toma de medidas
		23	Dibujado CAD
		24	Impresión 3D
	3º Falange dedo medio	25	Toma de medidas
		26	Dibujado CAD
		27	Impresión 3D
	1º Falange dedo anular	28	Toma de medidas
		29	Dibujado CAD
		30	Impresión 3D
	2º Falange dedo anular	31	Toma de medidas
		32	Dibujado CAD
		33	Impresión 3D
	3º Falange dedo anular	34	Toma de medidas
		35	Dibujado CAD
		36	Impresión 3D
	1º Falange dedo meñique	37	Toma de medidas
		38	Dibujado CAD
		39	Impresión 3D
	2º Falange dedo meñique	40	Toma de medidas
		41	Dibujado CAD
		42	Impresión 3D
	3º Falange dedo meñique	43	Toma de medidas
		44	Dibujado CAD
		45	Impresión 3D

	Articulaciones	46	Dibujo CAD	
		47	Impresion3D	
	Yemas dedo pulgar	48	Dibujo CAD	
		49	Impresion3D	
	Yemas dedo índice	50	Dibujo CAD	
		51	Impresion3D	
	Yemas dedo medio	52	Dibujo CAD	
		53	Impresion3D	
	Yemas dedo anular	54	Dibujo CAD	
		55	Impresion3D	
	Yemas dedo meñique	56	Dibujo CAD	
		57	Impresion3D	
	Sistema electrónico	Circuito controlador	58	Diseño del diagrama
			59	Compra de materiales
60			Conexión del servomotor con el Arduino	
61			Conexión del módulo de voz con el Arduino	
62			Configuración del circuito	
63			Instalación del modulo	

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Como los procesos son los mismos para algunas partes se puede reestructurar la tabla anterior resumiéndola de la siguiente manera

Tabla 22-3: Resumen de los materiales con horas.

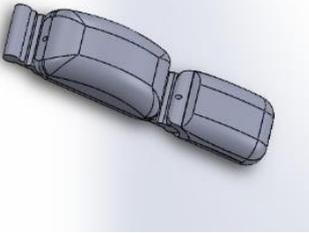
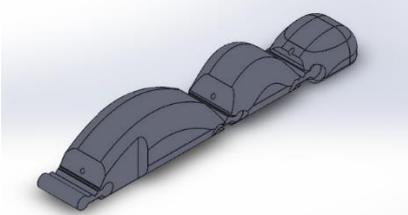
Sistema	Elemento	N.º	Operaciones	Tiempo (h)
Sistema motriz	Palma	1	Toma de medidas	0.5
		2	Dibujado CAD	8
		3	Impresión 3D	8
	1º Falange	4	Toma de medidas	1
		5	Dibujado CAD	7.5
		6	Impresión 3D	5
	2º Falange	7	Toma de medidas	1
		8	Dibujado CAD	7.5
		9	Impresión 3D	5

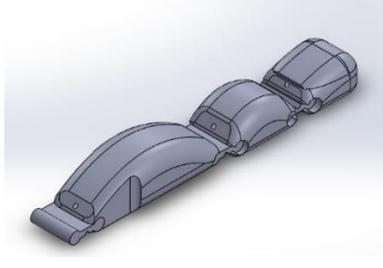
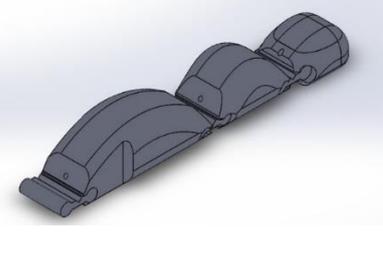
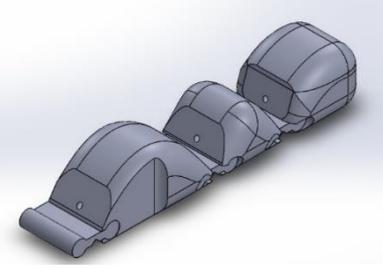
	3° Falange	10	Toma de medidas	1
		11	Dibujado CAD	7.5
		12	Impresión 3D	5
	Yema	13	Dibujo CAD	0.75
		14	Impresion3D	1
	Articulaciones	15	Dibujo CAD	0.5
		16	Impresion3D	2.5
Sistema electrónico	Circuito controlador	17	Diseño del diagrama	1
		18	Compra de materiales	5
		19	Conexión de los servomotores con el Arduino	0.15
		20	Conexión del módulo de voz con el Arduino	2
		21	Configuración del circuito	1
		22	Instalación de los servos	1
Tiempo total (h)				71.9

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

En el momento de la construcción del prototipo existen elementos que para acoplarse se debe tener un subensamblado para que la construcción sea más fácil y eficiente se muestran los componentes que se han unido para obtener un solo elemento.

Tabla 23-3: Listado de subensamblados.

Elemento subensamblado	Esquema	Elemento Final
1° falange dedo pulgar		Dedo pulgar
2° falange dedo pulgar		
Yemas dedo pulgar		
1° falange dedo índice		Dedo índice
2° falange dedo índice		
3° falange dedo índice		
Yemas dedo índice		

1° falange dedo medio		Dedo medio
2° falange dedo medio		
3° falange dedo medio		
Yemas dedo medio		
1° falange dedo anular		Dedo anular
2° falange dedo anular		
3° falange dedo anular		
Yemas dedo anular		
1° falange dedo meñique		Dedo meñique
2° falange dedo meñique		
3° falange dedo meñique		
Yemas dedo meñique		

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.26.2. Flujogramas de la construcción

Indican los pasos para la construcción de cada elemento, cada flujograma está de acuerdo con los sistemas.

3.26.2.1. Flujograma de la construcción del sistema motriz.

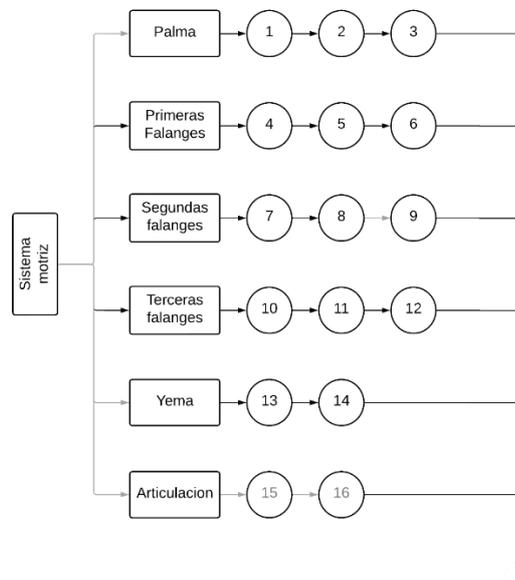


Ilustración 38-3: Flujograma del sistema motriz.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.26.2.2. Flujograma de la construcción del sistema electrónico

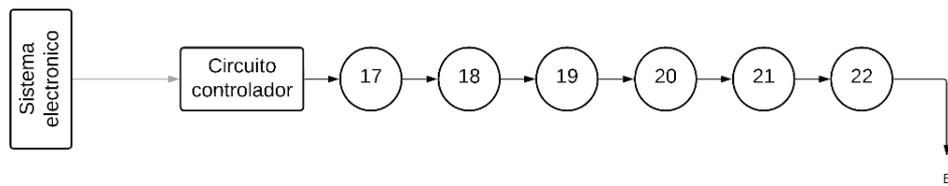


Ilustración 39-3: Flujograma del sistema electrónico.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.27. Montaje de la prótesis

Los tiempos de montaje irán de acuerdo con cada sistema de la prótesis transradial.

3.27.1. Montaje del sistema motriz

Se realizó el montaje del sistema motriz como se indica en la tabla 23-3.

Tabla 24-3: Proceso de montaje del sistema motriz.

Montaje sistema motriz		
Operación	Símbolo	Tiempo (h)
Ensamble de los dedos con las articulaciones	M1	0.75
Ensamble de la palma con las articulaciones	M2	0.25
Ensamble de la palma y dedos	M3	0.25
Ensamble de las yemas con los dedos	M4	0.25
Conexión de los dedos con el hilo nylon	M5	0.25
Conexión del hilo nylon al servomotor	M6	0.25
Subtotal		2

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.27.2. Montaje del sistema electrónico

Se realizó el montaje del sistema motriz como se indica en la tabla a continuación

Tabla 25-3: Proceso de montaje del sistema electrónico.

Montaje sistema motriz		
Operación	Símbolo	Tiempo (h)
Conexión de los servomotores a la prótesis	M7	0.25
Conexión del módulo y servos	M8	0.25
Conexión de la batería externa	M9	0.5
Instalación de los componentes en la prótesis	M10	0.25

Subtotal	1.25
----------	------

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.27.3. Flujograma del montaje de la prótesis

El flujograma nos indica las operaciones a realizar para el montaje de la prótesis de manera correcta y sin inconvenientes.

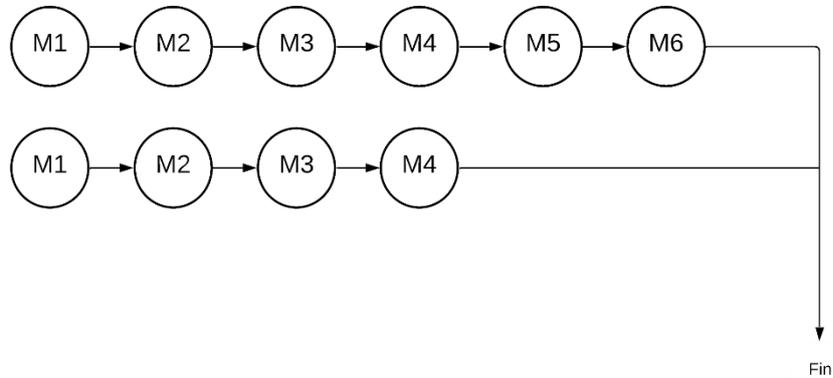


Ilustración 40-3: Proceso de montaje.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

La tabla 25-3 que se presenta a continuación indica todo el tiempo transcurrido para la construcción y montaje de la prótesis.

Tabla 26-3: Tiempo de montaje de la prótesis.

Tiempo de montaje	71.9
Tiempo de construcción	3.25
Tiempo total de la prótesis	75.15

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

El tiempo total de montaje es de 75.15 horas esto abarco la impresión, construcción y ensamble de toda la prótesis tanto su parte mecánica, como electrónica para obtener al final una prótesis funcional con nuestros parámetros

3.28. Pruebas

3.28.1. Pruebas en vacío

En la siguiente tabla 9-4 se presenta los resultados que se obtuvo con la prótesis en la prueba de vacío siendo la primera prueba que debe cumplir caso contrario se empieza a modifica

Tabla 27-3: Análisis de las pruebas en vacío.

Acción	Nivel de cumplimiento				
	No cumple 1	2	3	4	Total, cumplimiento 5
Abrir					X
Cerrar					X

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Se observa en la tabla que el funcionamiento en vacío es óptimo y cumple totalmente con lo previsto al inicio del

3.28.2. Pruebas con objetos

3.28.2.1. Toma de objetos ligeramente pesados

Se presenta en la siguiente tabla el desempeño de la prótesis en las acciones pruebas correspondientes

Tabla 28-3: Análisis de la toma de objetos ligeros.

Objetos	Peso (gr)	Nivel de cumplimiento				Total, cumplimiento 5
		No cumple 1	2	3	4	
Taza vacía	260		X			
Vaso vacío	40					X
Bote de cera	90				X	

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Se puede observar que cumple con los requisitos para lograr el movimiento de objetos ligeros dependiendo de su forma y su acabado superficial, en el caso de la taza vacía al ser un componente más pesado que los otros no lo consiguió de la mejor manera, pero en los otros casos se desarrolló de una manera precisa.

3.28.2.2. Toma de objetos moldeables

Se presenta en la siguiente tabla el desempeño de la prótesis en las acciones pruebas correspondientes

Tabla 29-3: Análisis de la toma de objetos moldeables

Objetos Moldeables	Peso (gr)	Nivel de cumplimiento				Total, cumplimiento 5
		No cumple 1	2	3	4	

Plastilina	19					X
Silicona	9					X
Fomix moldeable	5					X

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

En la tabla 28-3 se nos muestra que para los objetos moldeables no tiene problema para sujetarlos o transportarlos ni aplica tanta presión que deforma en el caso de la plastilina no se notó casi deformación, para la silicona se deforma un poco y después se volvió a su posición por las características del material y para el fomix moldeable si hubo una deformación considerable al ser el objeto más moldeable este quedo con la deformación más clara

3.28.2.3. Toma de objetos delicados

Se presenta en la siguiente tabla el desempeño de la prótesis en las acciones pruebas correspondientes.

Tabla 30-3: Análisis de la toma de objetos frágiles.

Objetos delicados	Nivel de cumplimiento					Total, cumplimiento
	Peso (gr)	No cumple 1	2	3	4	
Huevo	63					X
Vaso plástico	1					X
Cono de helado	12					X

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Se pudo observar con las pruebas que la prótesis no tiende a romper o siquiera trizar ninguno de los objetos que se planteó, al realizar las pruebas los sujeto de manera firme, pero sin fuerza suficiente como para romperlos.

3.28.2.4. Toma de objetos pequeños

Se presenta en la siguiente tabla el desempeño de la prótesis en las acciones pruebas correspondientes

Tabla 31-3: Análisis de la toma de objetos pequeños.

Objetos pequeños	Nivel de cumplimiento					Total, cumplimiento
	Peso (gr)	No cumple 1	2	3	4	
Bola espuma	1					X
Moneda	16	X				
Caja de fósforos	5				X	

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

3.28.2.5. Toma de objetos comunes

Se presenta en la siguiente tabla el desempeño de la prótesis en las acciones pruebas correspondientes

Tabla 32-3: Análisis de la toma de objetos comunes.

Objetos comunes	Nivel de cumplimiento					Total, cumplimiento
	Peso (gr)	No cumple 1	2	3	4	
Celular	220		X			
Cepillo	13		X			
Llavero	50			X		

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

En base a las pruebas realizadas se pudo comprobar que la prótesis le cuesta un poco agarrar este tipo de objetos comunes por lo tanto no es tan recomendable para objetos muy pesados o esbeltos.

3.28.2.6. Movimiento dinámico

Se presenta en la siguiente tabla el desempeño de la prótesis en las acciones pruebas correspondientes.

Tabla 33-3: Análisis del movimiento dinámico.

Movimiento dinámico	Nivel de cumplimiento					Total, cumplimiento
	Peso (gr)	No cumple 1	2	3	4	
Lego	5			X		
Pelotas	1					X

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Con las pruebas se observó que los trabajos que requieren de presión o de sostener con fuerza una pieza no se pueden realizar de una manera correcta, pero al mover el objeto a lugares cumplió de manera correcta y precisa.

3.28.2.7. De escritura

Se presenta en la siguiente tabla el desempeño de la prótesis en las acciones pruebas correspondientes

Tabla 34-3: Análisis del movimiento de escritura.

Escritura	Nivel de cumplimiento				Total, cumplimiento
	No cumple 1	2	3	4	
Esfero	X				

Computador					X
------------	--	--	--	--	---

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Se observo que para escritura con esfero la prótesis es capaz de sujetarlo, pero no es capaz de escribir con él por falta de fuerza de agarre, pero en cambio en el computador y colocando el agarre correcto se puede teclear palabras

3.28.3. Resumen de las pruebas

A continuación, se presenta una tabla 34-3 que es el resumen donde se detallan las pruebas que cumplen de manera óptima con su desarrollo y las cumplen de manera parcial o no lograron cumplir con la prueba.

Tabla 35-3: Tabla de resumen del cumplimiento.

No	Denominación	Objeto	Cumple (SI/NO)
1	Pruebas en vacío	Abrir	SI
		Cerrar	SI
2	Toma de objetos ligeramente pesados	Taza	NO
		Vaso	SI
		Bote de cera	SI
3	Toma de objetos moldeables	Plastilina	SI
		Silicona	SI
		Fomix moldeable	SI
4	Toma de objetos delicados	Huevo	SI
		Vaso plástico	SI
		Cono de helado	SI
5	Toma de objetos pequeños	Bola espuma	SI
		Moneda	NO
		Caja de fósforos	SI
6	Toma de objetos comunes	Celular	NO
		Cepillo	NO
		Llavero	SI
7	Movimiento dinámico	Colocar legos	NO
		Encestar bola	SI
8	Escritura	Computador	SI
		Esfero	NO

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. *Protocolo de pruebas*

Para crear un protocolo de pruebas para prótesis transradial, siga estos pasos:

- a) Identificación del objetivo: Definir los objetivos de la evaluación de la prótesis, incluyendo la evaluación de la funcionalidad, la comodidad, la durabilidad y la seguridad.
- b) Selección de las pruebas: Seleccione las pruebas que mejor evalúen los objetivos establecidos. Algunas pruebas comunes incluyen pruebas de fuerza, evaluación del rango movimiento, evaluación de la habilidad para realizar tareas cotidianas, y evaluación de la comodidad.
- c) Preparación del equipo: Asegurarse de que todo el equipo necesario esté disponible y en buenas condiciones, incluyendo la prótesis, las medidas de fuerza, los instrumentos de evaluación y las herramientas para realizar las pruebas.
- d) Instrucciones para el paciente: Asegurarse de que el paciente entienda el protocolo de pruebas y sus objetivos. Proporcionar instrucciones claras y precisas sobre cómo realizar cada prueba.
- e) Realización de las pruebas: Realice las pruebas según las instrucciones previas y registre los resultados de manera sistemática y objetiva.
- f) Análisis de los resultados: Analice los resultados de las pruebas para determinar el rendimiento de la prótesis en relación con los objetivos establecidos.
- g) Conclusión y recomendaciones: Elabore un informe conclusivo que incluya un resumen de los resultados, las conclusiones y las recomendaciones para mejorar el rendimiento de la prótesis.

Es importante recordar que cada paciente es único y lo que se obtenga de las pruebas pueden variar. Por lo tanto, es importante personalizar el protocolo de pruebas para satisfacer las necesidades individuales de cada paciente.

4.2. **Resultados de ANSYS**

Después de realizar el análisis en el software ANSYS colocando una fuerza que representa la tensión en el hilo para el movimiento se obtuvo los siguientes resultados.

Los resultados que se presentan a continuación nos presentan en primer lugar el desplazamiento, el segundo ser la deformación elástica y finalmente el esfuerzo de tensión

4.2.1. *Dedo pulgar*

Se observa en el gráfico que el motor provocara un desplazamiento de 6 mm del dedo por cada que tenga se active el motor.

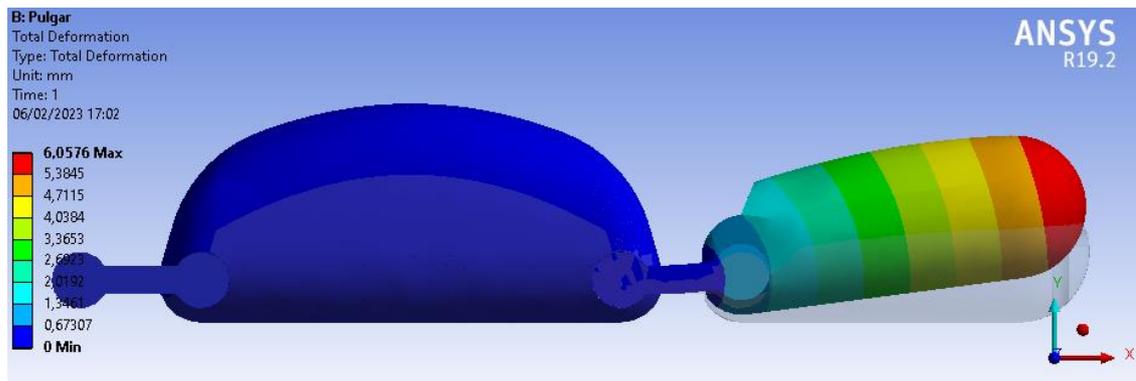


Ilustración 1-4: Movimiento resultante del dedo pulgar.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

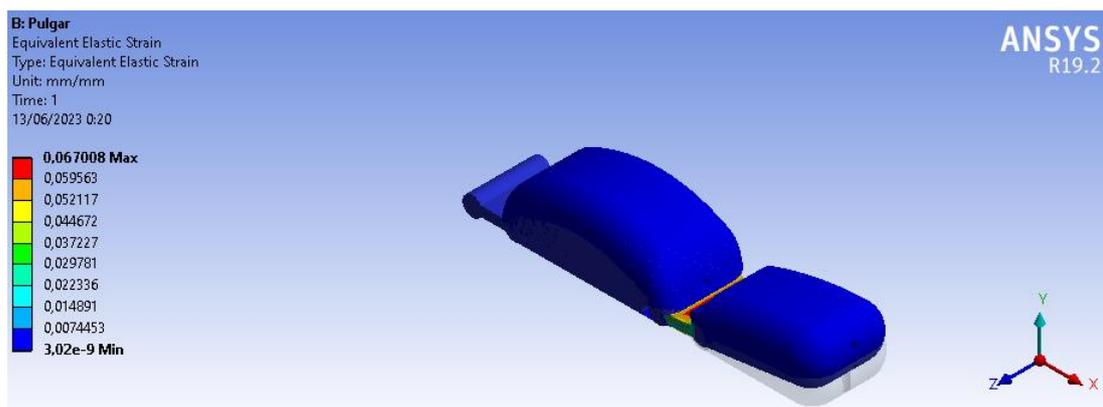


Ilustración 2-4: Esfuerzo tensor del dedo pulgar.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

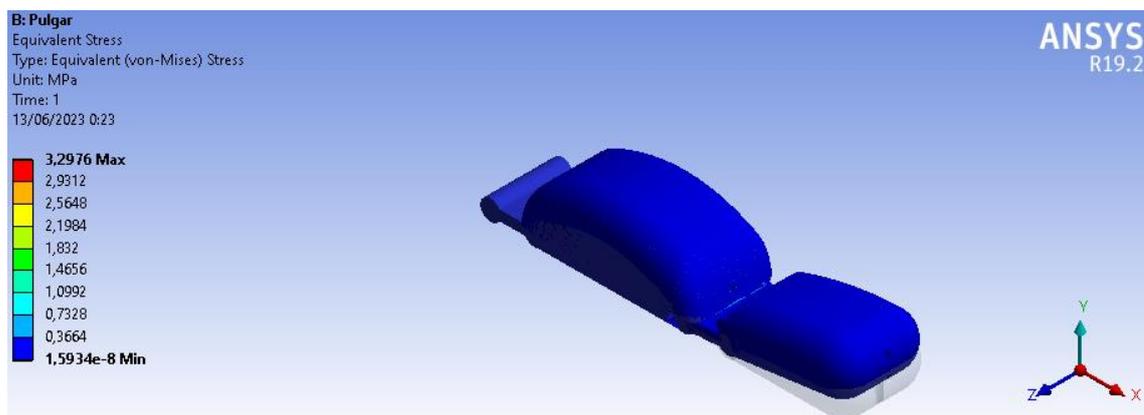


Ilustración 3-4: Esfuerzo von-Mises del dedo pulgar.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.2.2. *Dedo índice*

Se observa en el grafico el desplazamiento del índice será de 22 mm cuando se desplace el hilo nylon un centímetro de manera horizontal.

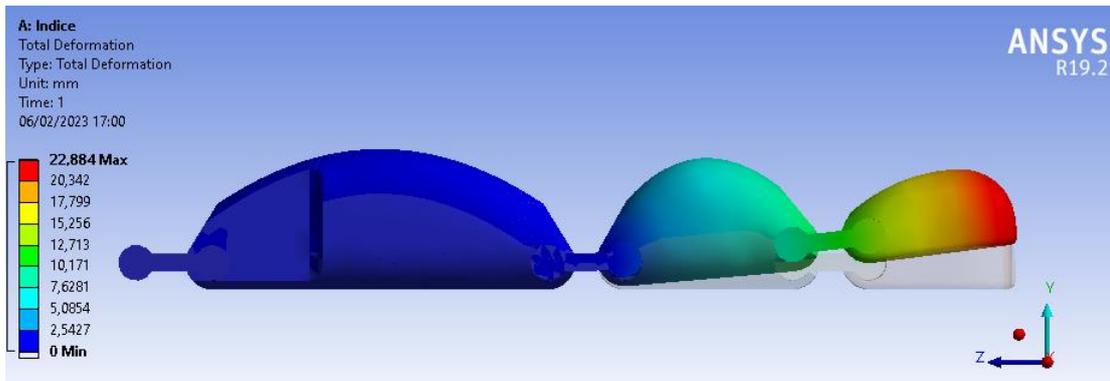


Ilustración 4-4: Movimiento resultante del dedo índice.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

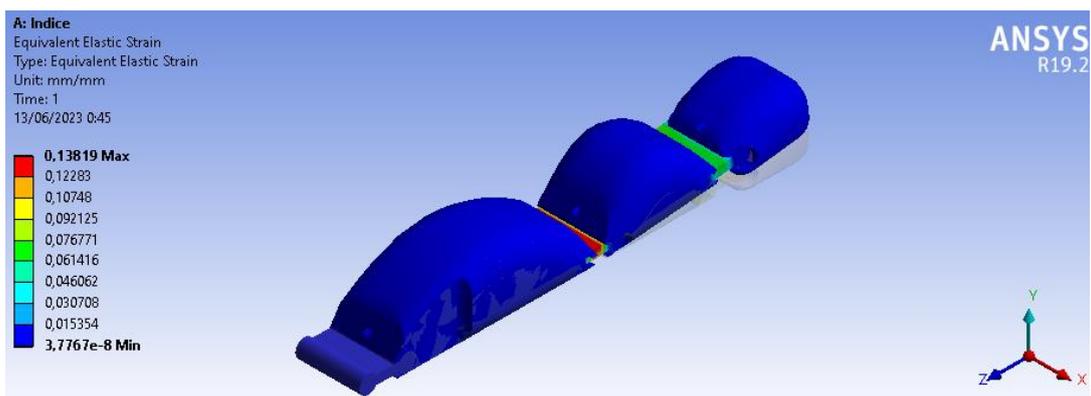


Ilustración 5-4: Esfuerzo tensor del dedo índice.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

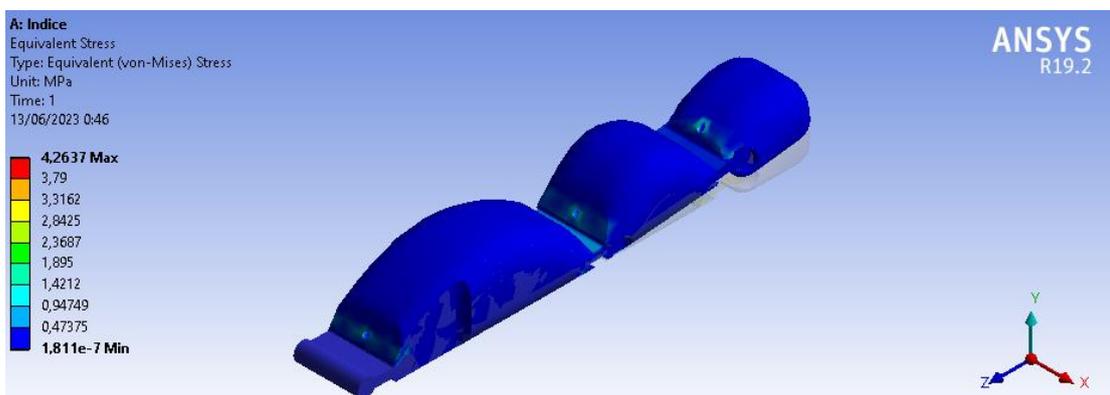


Ilustración 6-4: Esfuerzo Von-Mises del dedo índice.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.2.3. Dedo medio

En el gráfico observamos el movimiento que tendrá el dedo medio cuando se aplica la fuerza de tensión al hilo nylon que es de 2.4 mm.

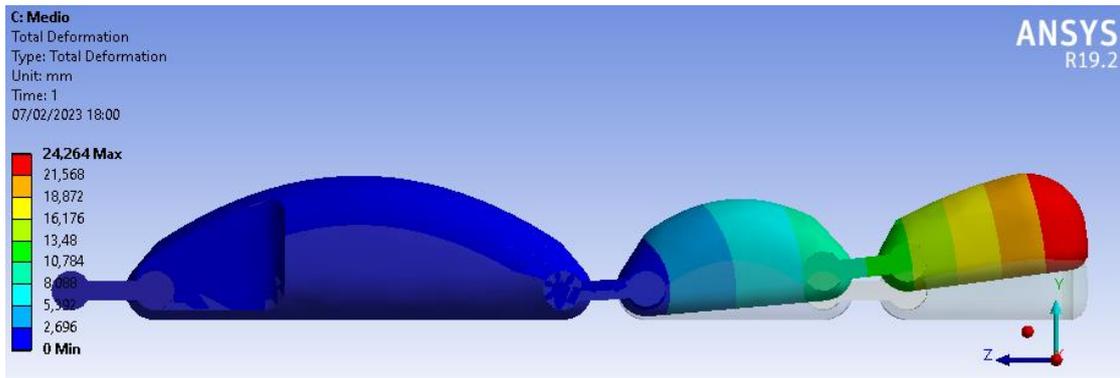


Ilustración 7-4: Movimiento resultante del dedo pulgar.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

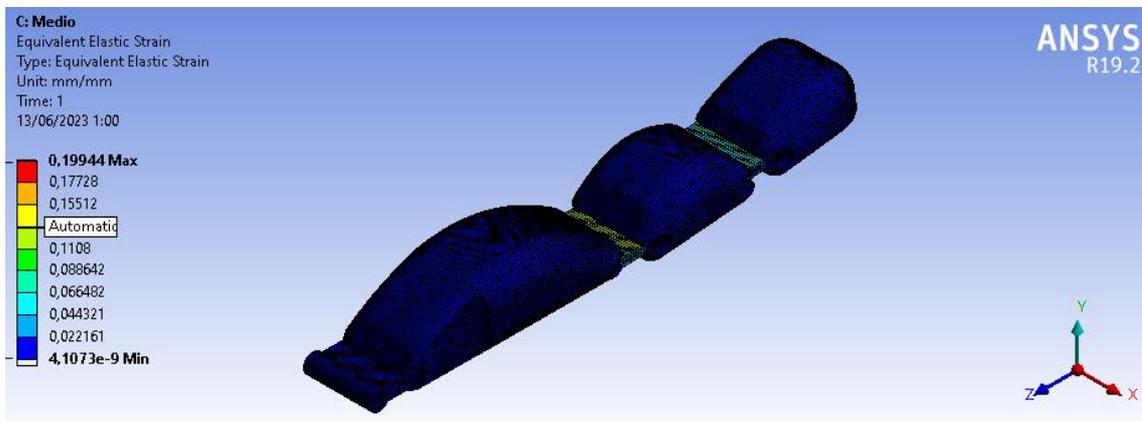


Ilustración 8-4: Esfuerzo tensor del dedo medio

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

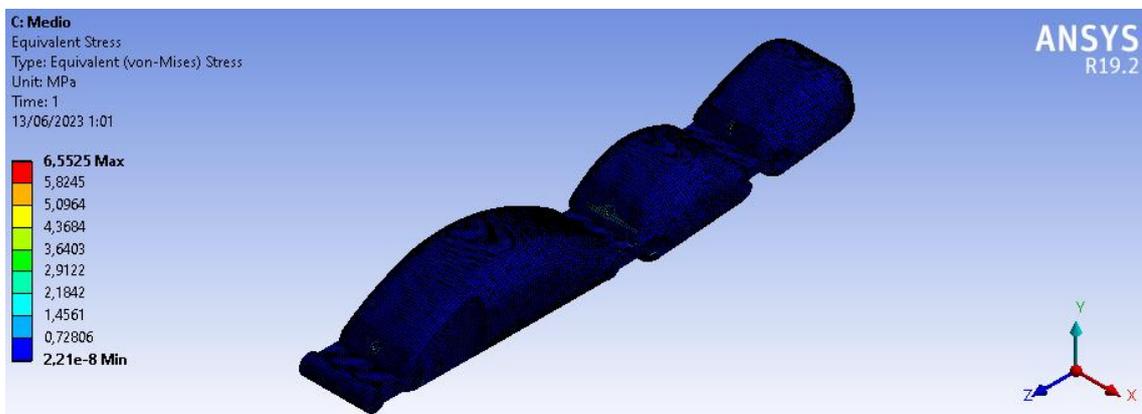


Ilustración 9-4: Esfuerzo Von-Mises del dedo medio.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.2.4. Dedo anular

En el grafico se observa el desplazamiento en el dedo anular cuando se aplica la fuerza de tensión al hilo nylon que es de 2.2 mm.

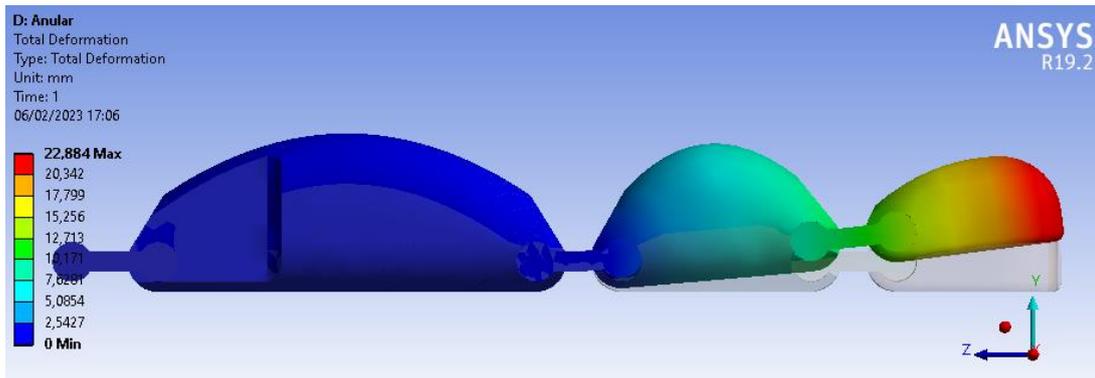


Ilustración 10-4: Movimiento resultante del dedo anular.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

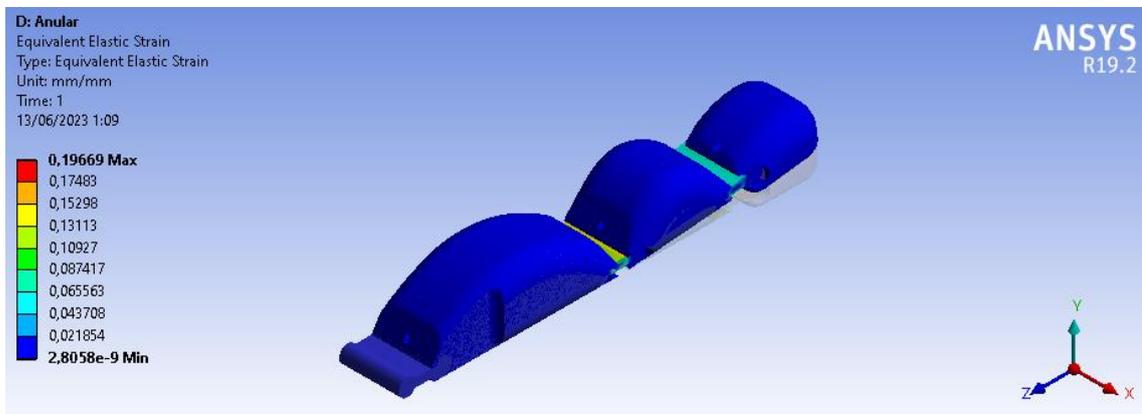


Ilustración 11-4: Esfuerzo tensor del dedo anular.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

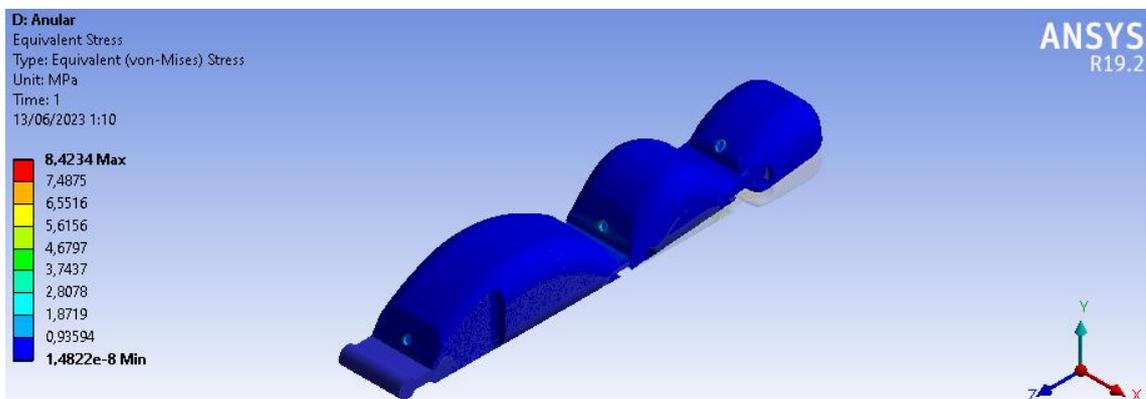


Ilustración 12-4: Esfuerzo Von-Mises del dedo anular.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.2.5. *Dedo meñique*

En el grafico se observa el desplazamiento en el dedo anular cuando se aplica la fuerza de tensión al hilo nylon que es de 2 mm.

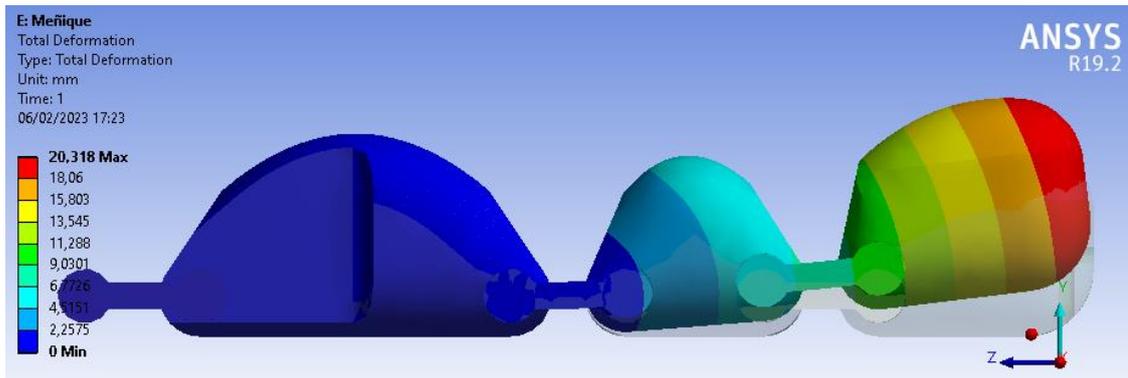


Ilustración 13-4: Movimiento resultante del dedo meñique.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

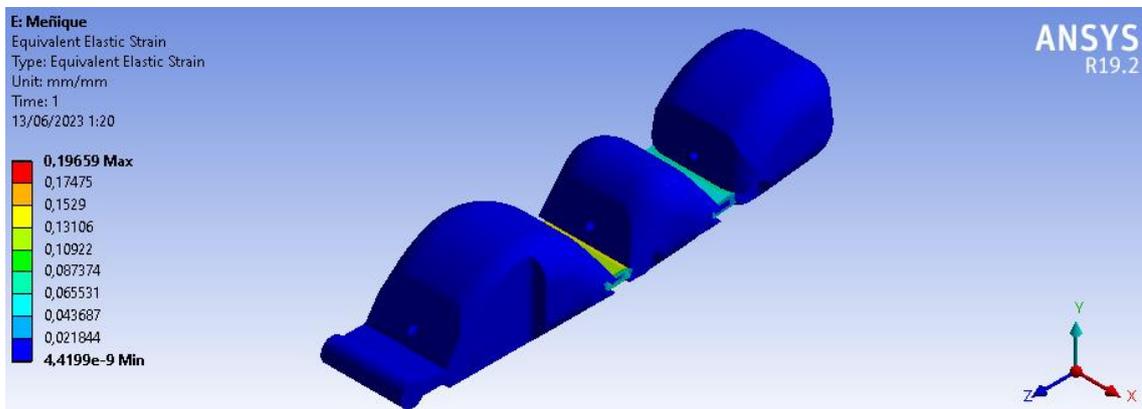


Ilustración 14-4: Esfuerzo tensor del dedo meñique.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

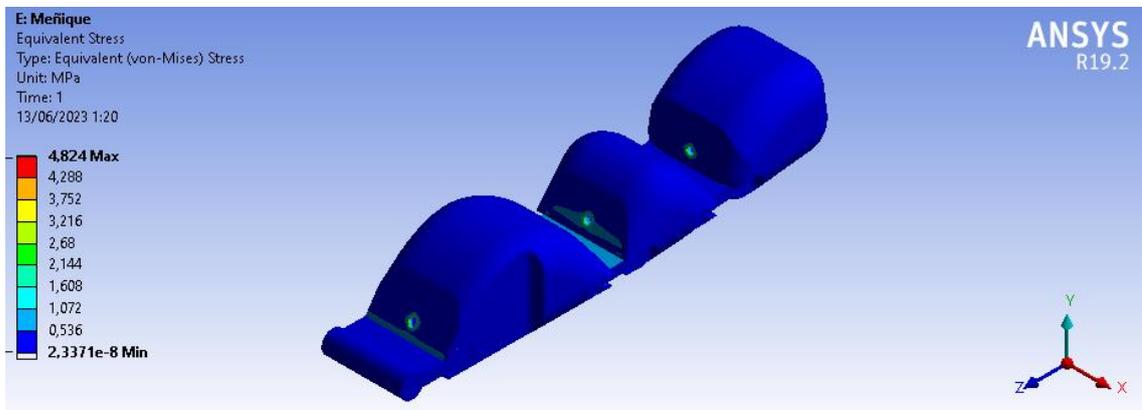


Ilustración 15-4: Esfuerzo Von-Mises del dedo índice.

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.3. Matrices de resultados

En la siguiente matriz se anotará si la prótesis reacciona correctamente al ser pronunciado el comando necesario para que desarrolle la función.

Tabla 1-4: Observaciones de los comandos.

Comando	Cumple función	No cumple función	Observaciones
Vaso	X		Siendo de un vaso de plástico no tan pesado
Lápiz		X	Se sujeta con dificultad y no se puede escribir
Cuchara		X	Se sujeta, pero se resbala
Abrir	X		
Cerrar	X		
Saludo	X		
Gancho	X		

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.4. Manual de operación

El siguiente manual se indicará las especificaciones, precauciones, como poner en marcha, operación, mantenimiento, ajustes, posibles problemas; además de ser muy necesario para los operadores

4.4.1. Vista general del equipo

En la siguiente figura se muestra los elementos generales de la prótesis transradial

4.4.2. Accesorios de la prótesis

Se presenta a continuación los diferentes accesorios adicionales a la prótesis que se componen para el ensamble total y funcional de la prótesis

4.4.2.1. Porta sistema de control

Es un elemento que sirve para transportar el controlador de voz, el Arduino uno y el módulo de carga de esta manera tenemos un accesorio que se coloca de otra manera y que se ajusta a cada persona está construido de PLA.

Su forma es diagonal para colocar el controlador, Arduino y módulo de carga de manera que encaje y no sufra de movimientos.

4.4.2.2. Micrófono

Se cambio el micrófono por que se necesitaba uno que mejorara la recepción de la voz puesto que con el de fabrica se tenía mucho ruido al ingresar el comando, para lo que se cambió por uno con mejor definición y con un cable más largo para mejorar la comodidad del usuario

Especificaciones

4.5. Características de la prótesis

La prótesis presenta las siguientes características que se detallan en la tabla a continuación

Tabla 2-4: Características de la prótesis.

Prótesis transradial	
Características generales	Dimensiones generales:
	Alto:
	Largo: 290.04 mm
	Ancho:90.45
	Capacidad de carga: 150 máx.
	Material de construcción: PLA y TPU
Servomotor de 20kg	
Peso total:315 gr	

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.6. Instalación del equipo.

Para obtener el desempeño óptimo de la prótesis es importante tener en claro cómo se debe colocar la prótesis para que no haya fallo

- ✓ Colocación de la prótesis: La colocación correcta de la prótesis es fundamental para su funcionamiento adecuado. Es importante asegurarse de que la prótesis esté bien ajustada al muñón y que no se mueva durante el uso. Para lograr una buena sujeción, se debería utilizar correas y otros dispositivos de fijación que varían según el paciente.
- ✓ Conexión de los servomotores: La prótesis se controla mediante voz, pero antes de ponerla en funcionamiento es necesario acoplar los servomotores a la placa general. Además de que el porta sistema electrónico este colocado ya en el brazo, se recomienda realizar este proceso con una persona que ayude a colocar de manera correcta los servomotores, para que la prótesis realice los diferentes comandos de una manera correcta.
- ✓ Encendido del prototipo: La prótesis transradial para su encendido se realiza por medio de un interruptor ubicado en por la parte interna del porta sistema electrónico. La única indicación es colocar de una manera suave el interruptor al otro lado el momento que se requiera utilizar. La duración de la batería es de aproximadamente 4 horas de uso constante, se recomienda apagarla cuando no se la esté utilizando para preservar por más tiempo la batería.
- ✓ Inicio del movimiento: Una vez que la prótesis está encendida, se puede comenzar a realizar movimientos. Los movimientos se controlan mediante los comandos de voz que

se tiene especificados. Es importante recordar que el uso de la prótesis puede requerir cierta práctica para lograr un control preciso y fluido. Además, los ajustes de la prótesis pueden variar según lo que necesite el usuario, por lo que es importante trabajar con el equipo de rehabilitación para ajustar la prótesis según sea necesario.

- ✓ Práctica y ajustes: La práctica es esencial para lograr un uso efectivo y seguro de la prótesis. Es importante trabajar con un equipo de rehabilitación para determinar los ajustes óptimos y las actividades de entrenamiento que deben realizarse para lograr un mejor control de la prótesis. Los ajustes de la prótesis pueden incluir cambios en la sensibilidad

4.6.1. *Requisitos necesarios*

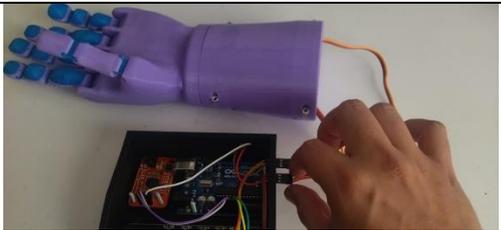
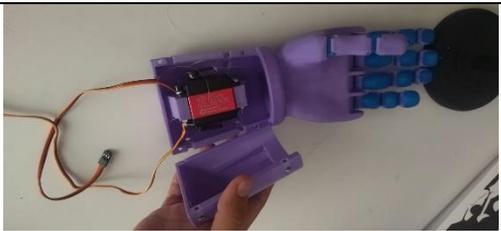
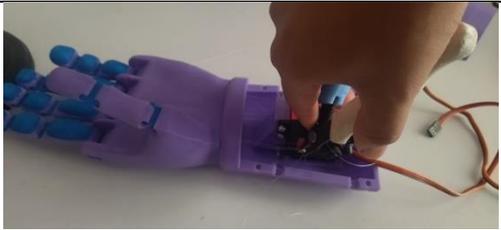
Para comenzar a utilizar la prótesis es necesario:

- ✓ Las baterías estén cargadas
- ✓ La prótesis y su caja estén aseguradas

4.7. Instrucciones de operación

4.7.1. *Intercambio del hilo nylon*

Tabla 3-4: Cambio de los hilos nylon.

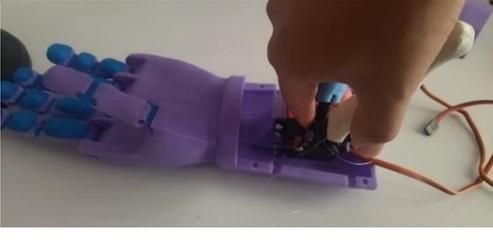
Desconectar los servomotores	
Destapar la muñeca	
Cortar el hilo roto del servomotor	
Desamarrar el hilo roto del dedo	

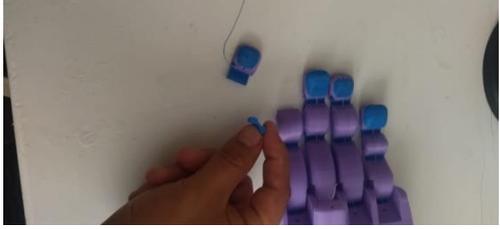
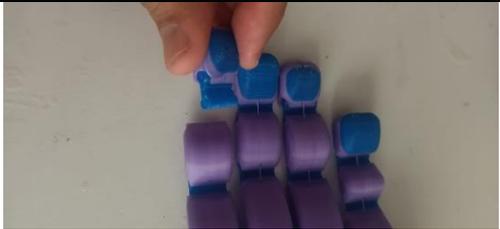
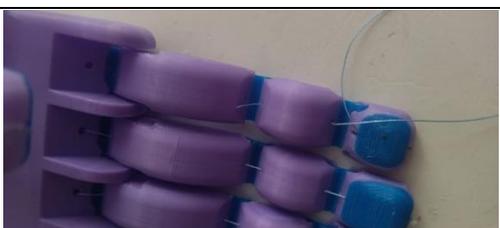
Retirar los hilos rotos	
Amarrar el hilo al dedo	
Pasar el hilo por todos los espacios del dedo	
Amarrar el hilo nuevo al servomotor	

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.7.2. Intercambio de las articulaciones

Tabla 4-4: Cambio de las articulaciones.

Cortar el hilo nylon del dedo a remplazar	
Desacoplar la falange de la articulación	

Desacoplar la articulación dañada	
Remplazar la articulación	
Colocar de nuevo la falange	
Colocar de nuevo el hilo nylon	

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.8. Manual de mantenimiento

los elementos de la prótesis tenderán a sufrir un desgaste en los elementos y piezas que lo componen por su uso. Si no realizamos un correcto mantenimiento y corrección de los problemas que puedan surgir la prótesis ira perdiendo eficiencia hasta que se quede inutilizada

En el siguiente apartado se tratará los principales detalles para tener en cuenta para el mantenimiento de la prótesis.

Tabla 5-4: Tiempos para revisión de los elementos que sufren desgaste.

Periodos de trabajo	Elementos principales					Trabajos para realizar
	Cables	Hilos nylon	Articulaciones	Servomotores	Baterías	
M		X				Reemplazo
T			X			Revisión de conexión

A	X			X	X	Tensionar
---	---	--	--	---	---	-----------

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

Donde

M= Mensual

T= Trimestral

A= Anual

4.9. Análisis de costos

Para analizar lo que se gastó en total en la construcción de la maquina se ha dividido los costos en los sistemas que se construyó para la prótesis para lograr un análisis más específico de las piezas que se han hecho.

Tabla 6-4: Partes de la prótesis.

ítem	descripción
1	Sistema motriz
2	Sistema electrónico

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.9.1. Costos directos

Estos costos se refieren a los gastos que intervienen directamente en la construcción de la prótesis como son, materiales, mano de obra, equipos, herramientas y transporte.

4.9.1.1. Costos de los materiales

El costo de los materiales dependerá de los materiales que utilizamos en este caso son dos el PLA y el TPU. Son los materiales que se utilizó para la impresión de los diferentes elementos.

Tabla 7-4: Costo de los materiales.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
PLA	Rollo	1	\$ 25	\$ 25
TPU	Rollo	1	\$ 35	\$ 35
Módulo de voz	U	1	\$ 60	\$ 60
Módulo de carga	U	1	\$ 15	\$ 15
Arduino Uno	U	1	\$ 20	\$ 20
Baterías lipo	U	2	\$ 2.5	\$ 5
Cables	U	20	\$ 0.2	\$ 4
Cuerda nylon	Rollo	1	\$ 1.5	\$ 1.5
Estaño	Rollo	1	\$ 1.5	\$ 1.5
Pulsador	U	1	\$ 0.5	\$ 0.5
Servomotor 20Kg	U	1	\$ 28	\$ 28
Servomotor 15Kg	U	1	\$ 40	\$ 40
Micrófono de corbatín	U	1	\$ 35	\$ 35
Pegamento (Brujita)	U	1	\$ 3.5	\$ 3.5
SUBTOTAL				\$ 274

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.9.1.2. Costos de los equipos y herramientas

Se detalla a continuación los costos por equipos y herramientas utilizadas.

Tabla 8-4: Costos de los equipos y herramientas.

Descripción	Subtotal (\$)
Computadora (alquiler)	\$ 400
Impresora 3D	\$ 450
Pinza	\$ 2
Cautín	\$ 14
Destornilladores	\$ 4.5
Taladro manual	\$ 30
Pinzas de joyero	\$ 3
Multímetro	\$ 25
Estilete	\$ 3
Subtotal	\$ 931.5

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.9.1.3. Costos de mano de obra y transporte

Se detalla a continuación los costos por mano de obra y transporte, para la mano de obra se toma en cuenta el cálculo por hora de trabajo que se tiene con un sueldo básico en Ecuador de \$450.

Tabla 9-4: Costos de mano de obra y transporte.

Descripción	Subtotal (\$)
Mano de obra	\$ 202.5
Transporte	\$ 40

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.9.1.4. Costo total directo

Este será el resultado al sumar los subtotales de los dos apartados anteriores para obtener los costos totales directos.

Tabla 10-4: Costo total directo.

COSTOS DIRECTOS	Materiales	\$ 274
	Equipos y Herramientas	\$ 931.5
	Mano de Obra	\$ 202.5
	Transporte	\$ 40
TOTAL	\$ 1448	

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.9.2. Costos indirectos

Los costos indirectos se refieren son aquellos que no abarcan ninguno de los costos que se mencionó anteriormente.

4.9.2.1. Costo Ingenieril

Se detalla a continuación los costos ingenieriles en este caso siendo el diseño del prototipo.

Tabla 11-4: Costos indirectos.

Descripción	Subtotal
Diseño	\$ 120
Imprevistos	\$ 0
Utilidad	\$ 0
Total	\$ 120

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

4.9.3. Costo total

Es la suma de los costos directos y los indirectos

Tabla 12-4: Costo total de la prótesis.

Costos directos	\$ 1448
Costos indirectos	\$ 120
Total	\$ 1568

Realizado por: Melo, F.; Mera, J. 2022.

El costo total del trabajo de integración curricular será de 1568 dólares considerando los costos de mano de obra respectivamente y a su vez el costo del diseño.

CONCLUSIONES

Con el análisis del mecanismo se logró conseguir mediante cinemática directa e inversa la respectiva posición para cada dedo, encontrándose velocidad de cada dedo y sus respectivas aceleraciones, teniendo como un valor máximo aproximado de 0.057mm/s para el pulgar y de 0.62mm/s para los demás dedos, la aceleración del dedo pulgar 1.179mm/s² y de los demás dedos es de 0,35mm/s².

En las pruebas realizadas a diferentes objetos se observó que el peso máximo que se consiguió levantar pero con mucha dificultad fue de 220 gramos y el peso ideal para un correcto funcionamiento varía entre los 100 y 120 gramos, también se observó que al momento de levantar objetos pequeños si estos están sobre una superficie plana y a la vez son planos, es imposible de levantarlos por su forma como lo fue al momento de levantar una moneda u otros objetos similares, de la misma manera se consiguió levantar y trasladar con facilidad objetos que sean redondos o tengan una superficie grande que mejoraron el agarre.

En el análisis mediante ANSYS se logró un mallado con un valor de 0.83 que es considerado una calidad de malla alta, para este caso se usó un tipo de malla quad tri con reducción de tamaño siendo la óptima para obtener los mejores resultados, mientras que Blender por defecto usa una malla hexagonal que se adapta a las curvaturas presentes, de la misma manera se obtuvo un tamaño de 0.5mm promedio para los hexágonos.

Para el costo se logró conseguir un valor menor al promedio de una prótesis estética teniendo un costo de aproximadamente \$1568, en todo el estudio del prototipo con esto el costo posterior para generar nuevas prótesis será mucho menor.

RECOMENDACIONES

Para poder tener un modelo que sea completamente funcional se debe realizar varios prototipos rápidos ya que teniéndolos físicamente es más fácil ver los fallos, hay que considerar que al ser modelos orgánicos el diseño es diferente y mucho más complejo.

Para este caso al ser un modelo de cuerdas se debe tomar en cuenta que los canales por donde se va a dirigir las cuerdas no deben tener esquinas y procurar ser redondos ya que la fricción va a cortar las cuerdas en muy poco tiempo.

Para la construcción de la prótesis se deberá tener en cuenta todas las necesidades y adecuaciones del usuario final, para que este se sienta cómodo con la prótesis y no moleste en su diario vivir.

Tener cuidado en la colocación de los dedos y articulaciones puesto que si se colocan mal el movimiento no será el adecuado o no se logrará una buena sujeción en la prótesis.

El momento que se quiera utilizar la prótesis para sujetar algo liso asegurarse que este en una posición en la cual nos permita sujetar lo por la forma mas no por su textura o acabado.

En caso de que la prótesis comience a fallar o haga ruidos extraños apagar y llevar de inmediato con el personal adecuado.

No dar sobrecargas a la prótesis ya que esto puede llevar a consumir demasiado rápido las baterías, considerando que cada vez que se sobre esfuerza la batería debe suministrar más energía, de la misma manera si se excede la carga o se lo sobre carga se pueden quemar los motores.

Realizar pruebas previas que comprueben las acciones que es capaz de realizar la prótesis, además de cuales no puede realizar, se recomienda que se realice siempre varias pruebas y practicar ya que al prototipo ciertos objetos le cuesta mucho levantar.

BIBLIOGRAFÍA

ALONSO ERIC, Paz Velita. *Diseño y simulación de prótesis transradial para pacientes amputados mediante parametrización, procesamiento digital de imágenes y adquisición de señales electromiográficas* [en línea]. Universidad Ricardo Palma, 2021, pp 18-32 [consulta:16 de enero de 2023]. Disponible en: [Diseño y simulación de prótesis transradial para pacientes amputados mediante parametrización, procesamiento digital de imágenes y adquisición de señales electromiográficas \(urp.edu.pe\)](http://www.urp.edu.pe)

CORTES OSORIO, Jimmy Alexander et al. *Criterios de selección de las herramientas de desarrollo para microcontroladores pic.* Scientia Et Technica [en línea]. 2009, XV (43), pp 187–192 [Consulta: 15 de enero de 2023]. ISSN 0122-1701. Disponible en: [CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE DESARROLLO PARA MICROCONTROLADORES PIC \(redalyc.org\)](http://redalyc.org)

CUESTA SANTANA, Juan Diego. *diseño y construcción de una prótesis para amputación transradial de miembro superior derecho utilizando control mioeléctrico* [en línea]. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2022 [Consulta: 20 de diciembre de 2022]. Disponible en: [Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: Diseño y construcción de una prótesis para amputación transradial de miembro superior derecho utilizando control mioeléctrico \(ups.edu.ec\)](http://www.ups.edu.ec)

DORADOR, J., et al. “Robótica y prótesis inteligentes”. *Revista Digital Universitaria UNAM* [en línea], 2004, (México) 6(1), pp. 1-15. [Consulta: 12 Diciembre 2022]. ISSN 1067-6079. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228438883_Robotica_y_protesis_inteligentes

FERNANDO LUIS, García Ayola et al. *Design and fabrication of a myoelectric prosthesis for trans-radial amputee* [en línea]. 2020, 2(4), pp 9 [Consulta: 25 de diciembre de 2022]. Disponible en: [u830592.pdf \(uniandes.edu.co\)](http://uniandes.edu.co)

GOROSITO, Martin Alejandro. *Prótesis Funcional de Miembro Superior controlada a partir de dispositivo Myo*, pp 32-81 [en línea]. Universidad Nacional de Córdoba, 2017 [consultado el 25 de enero de 2023]. Disponible en: [Prótesis funcional del miembro superior controlada a partir de dispositivo Myo](http://www.una.edu.ar)

LÓPEZ, G. & MARGNI, S. “Introducción al funcionamiento básico de microcontroladores PCI” (Trabajo de titulación). Universidad de la República Oriental del Uruguay, Facultad de Ingeniería. Montevideo-Uruguay. 2003. p. 5-25.

LOPEZ MORILLO, María Jimena. *Diseño de prótesis de mano Servoactuada y fabricación de prototipo con técnicas de impresión 3d* [en línea]. Universidad Nacional de Cuyo, 2018. Pp 7-22. [Consulta: 6 de enero de 2023]. Disponible en: [Diseño de prótesis de mano servoactuada y fabricación de prototipo con técnicas de impresión 3D \(cnea.gov.ar\)](http://www.cnea.gov.ar)

MATIZ BERNAL, Juan Manuel. *Fabricación de prótesis transradial considerando la parametrización de sus componentes tomando como variables las medidas antropométricas del usuario* [en línea]. Universidad Santo Tomas, 2017 [Consulta: 6 de enero de 2023]. Disponible en: [Fabricación de prótesis transradial considerando la parametrización de sus componentes tomando como variables las medidas antropométricas del usuario \(usta.edu.co\)](http://usta.edu.co)

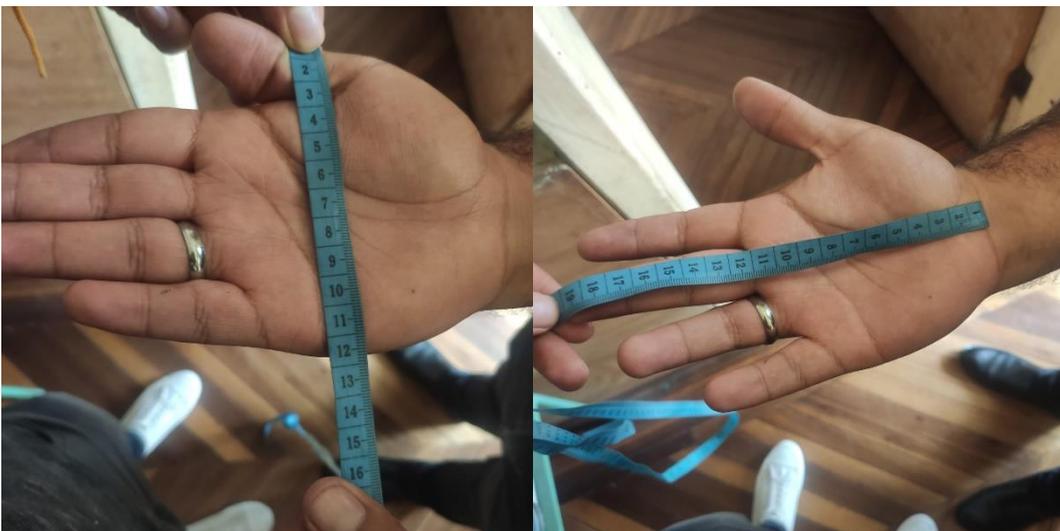
MURPHY, D. *Fundamentals of amputation care and prosthetics*. New York-Estados Unidos: Demos Medical Publishing LLC, 2014. ISBN 9781936287703. pp. 104-175.

PAZMIÑO ARMIJOS, Alexandra Orfelia et al. *Fabricación de una prótesis transradial para infantes impresa en 3D con filamento flexible y pla*. Polo del conocimiento [en línea]. 2022, 7(4), pp 10 [Consulta: 8 de enero de 2023]. ISSN 2550-682X. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAIQw7AJahcKEwjw7YS9gtj_AhUAAAAAHQAAAAAQAw&url=https%3A%2F%2Fdigitalnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F8483005.pdf&psig=AOvVaw2yHjn_9oEQhFsX4IbC3yf2&ust=1687562533017118&opi=89978449

RIOS MESA, Andrés. *Desarrollo de una prótesis transradial externa para miembro superior basada en impresión 3D*. Creative Commons [en línea]. 2022, 1(2), pp 51 [Consulta: 26 de enero de 2023]. Disponible en: [content \(usb.edu.co\)](http://usb.edu.co)

ANEXOS

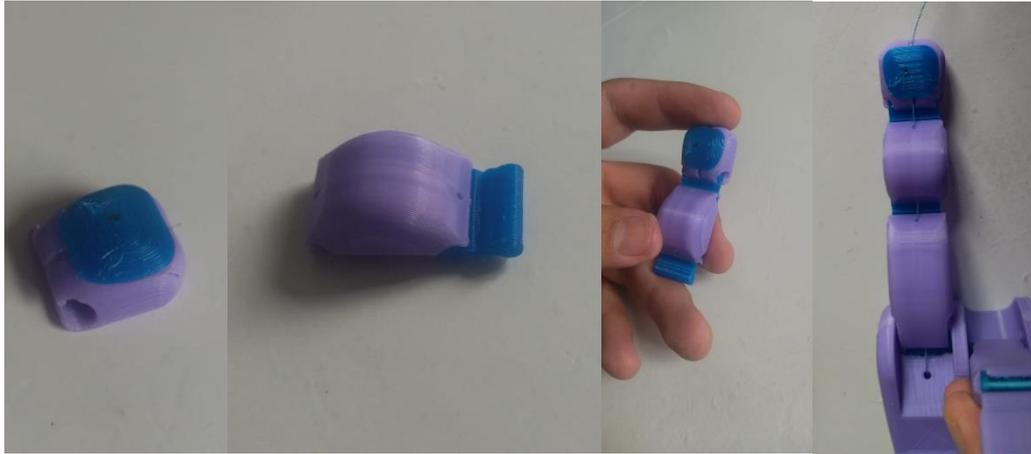
ANEXO A: TOMA DE MEDIDAS.



ANEXO B: COMPONENTES DEL PROTOTIPO.



ANEXO C: PREEENSAMBLES.



ANEXO D: PRUEBAS

