



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Desarrollo de un prototipo automático de exoesqueleto con movimiento mecánico para la rehabilitación de la muñeca en personas adultas

JAVIER EDUARDO GUERRERO JARAMILLO

**Trabajo de Titulación modalidad Proyecto de Investigación y Desarrollo,
presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH,
como requisito parcial para la obtención del grado de:**

MAGÍSTER EN DISEÑO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

Octubre 2023

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Javier Eduardo Guerrero Jaramillo, declaro que **el presente Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría

Riobamba, agosto 2023

JAVIER EDUARDO GUERRERO JARAMILLO

No. 0603321415

©2023, Javier Eduardo Guerrero Jaramillo

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



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación, modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado **Desarrollo de un prototipo automático de exoesqueleto con movimiento mecánico para la rehabilitación de la muñeca en personas adultas**, de responsabilidad del señor Javier Eduardo Guerrero Jaramillo, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos y legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes, Mgtr.

PRESIDENTE



Firmado electrónicamente por:
JORGE
ISAÍAS
CAICEDO
REYES

Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba, Mgtr.

DIRECTOR



Firmado electrónicamente por:
SOCRATES
MIGUELAQUINO
ARROBA

Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla, Mgtr.

MIEMBRO



Firmado electrónicamente por:
EDWIN
RODOLFO
POZO
SAFLA

Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade, Mgtr.

MIEMBRO



Firmado electrónicamente por:
GEOVANNY GUILLERMO
NOVILLO ANDRADE

Riobamba, octubre 2023

DEDICATORIA

A mi esposa Betty, a mis hijos Javiercito y Lolita, dedico este triunfo quienes estuvieron siempre presentes en este largo caminar hasta cumplir esta meta y fueron mi inspiración para seguir esforzándome cada día. A mis padres Eduardo y Zoila por sus sabios consejos quienes con su amor siempre me dieron fuerza para seguir adelante y no desmayar ante las adversidades. A mis hermanas Alexandra y Vanessa que con sus palabras me motivaban siempre para culminar este proyecto.

Javier Eduardo Guerrero Jaramillo

AGRADECIMIENTO

A Dios y a mi Madre Dolorosa por darme la sabiduría y fortaleza por culminar una meta más en mi vida profesional.

A mi tutor Ing. Miguel Aquino por asesorarme y guiarme en el desarrollo de la tesis, desde el inicio hasta la culminación del trabajo de Titulación.

A mis asesores Ing. Geovanny Novillo e Ing. Edwin Pozo, con sus conocimientos ayudaron en mi formación personal y brindar sus conocimientos para culminar con satisfacción la titulación.

Javier

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO I | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Planteamiento del problema..... | 1 |
| 1.1 Situación problemática..... | 1 |
| 1.3 Formulación del Problema | 2 |
| 1.4. Preguntas directrices o específicas de la investigación..... | 2 |
| 1.5 Justificación de la Investigación | 3 |
| 1.6 Objetivo general..... | 3 |
| 1.7 Objetivos Específicos..... | 3 |
| 1.8. Hipótesis..... | 3 |
| 1.8.1 Hipótesis General..... | 3 |
| 1.8.2 Hipótesis Específicas | 4 |
| CAPÍTULO II | 5 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 2.1 Antecedentes del problema | 5 |
| 2.2 Bases teóricas..... | 6 |
| 2.2.1 Mecanismos y Máquinas..... | 6 |
| 2.2.2 La Muñeca y sus movimientos..... | 7 |
| 2.2.2.1 Pronación – Supinación..... | 7 |
| 2.2.2.2 Flexión - extensión..... | 8 |
| 2.2.2.3 Abducción – aducción..... | 9 |
| 2.2.3 Fases de la Rehabilitación..... | 10 |
| 2.2.3.1 Movimiento de Flexión – Extensión..... | 10 |
| 2.2.3.2 Movimiento de Aducción – Abducción..... | 10 |
| 2.2.3.3 Movimiento de Pronación - Supinación..... | 11 |
| 2.2.4 Antropometría humana..... | 12 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| 2.2.4.1 | Longitud Codo a la punta de los dedos en posición sentado..... | 12 |
| 2.2.5 | Peso mano y antebrazo del cuerpo humano | 13 |
| 2.2.6 | Exoesqueleto | 13 |
| 2.2.7 | Materiales de prototipos exoesqueletos..... | 14 |
| 2.2.7.1 | Ácido poliláctico (PLA)..... | 14 |
| 2.2.7.2 | Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)..... | 15 |
| 2.2.8 | Selección de materiales para prototipos exoesqueletos..... | 16 |
| 2.2.9 | Fuerzas dinámicas en Materiales | 16 |
| 2.2.9.1 | Propiedades Mecánicas | 16 |
| 2.3 | Marco Conceptual | 17 |
| 2.3.1 | La automatización | 17 |
| 2.3.2 | Placa Arduino Mega..... | 17 |
| 2.3.3 | Servomotores | 17 |
| 2.4. | Identificación de variables | 17 |
| 2.5 | Operacionalización de variables | 18 |
| 2.6 | Matriz de consistencia..... | 20 |
| CAPÍTULO III | | 22 |
| 3. | METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN..... | 22 |
| 3.1. | Metodología de la Investigación | 22 |
| 3.1.1. | Tipo y diseño de Investigación | 22 |
| 3.1.2. | Métodos de investigación..... | 22 |
| 3.1.2.1. | Método Analítico | 22 |
| 3.1.2.2. | Método deductivo..... | 22 |
| 3.1.2.3. | Método Científico | 22 |
| 3.1.3 | Enfoque de la Investigación..... | 22 |
| 3.1.4. | Alcance de la Investigación | 23 |
| 3.1.5 | Población de estudio | 23 |
| 3.1.6 | Unidad de análisis | 23 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.1.7 | Selección de la muestra..... | 23 |
| 3.1.8. | Tamaño de la muestra | 23 |
| 3.1.9 | Técnicas de recolección de datos primarios y secundarios | 23 |
| 3.1.10 | Instrumentos para procesar datos recopilados..... | 24 |
| 3.2 | Desarrollo de un prototipo automático de exoesqueleto con movimiento mecánico para la rehabilitación de la muñeca en personas adultas | 24 |
| 3.2.1 | Introducción | 24 |
| 3.2.2. | Parámetros de diseño..... | 24 |
| 3.2.3. | Parámetros funcionales | 25 |
| 3.2.3.1. | Restricciones y limitaciones..... | 26 |
| 3.2.3.2. | Ambiente de trabajo. | 26 |
| 3.2.4 | Determinación de las especificaciones de la máquina | 26 |
| 3.2.5 | Matriz QFD o desarrollo de la función de calidad..... | 26 |
| 3.2.5.1 | Voz del usuario. | 26 |
| 3.2.5.2 | Voz del diseñador..... | 27 |
| 3.2.5.3. | Resultados de la matriz QFD. | 27 |
| 3.2.5.4. | Conclusiones de la matriz QFD. | 28 |
| 3.2.6 | Especificaciones técnicas | 29 |
| 3.2.7 | Análisis funcional..... | 30 |
| 3.2.7.1 | Definición de módulos. | 31 |
| 3.2.8 | Selección del mecanismo para el prototipo exoesqueleto..... | 31 |
| 3.2.9. | Características del prototipo rehabilitador de muñeca seleccionado..... | 33 |
| 3.2.10. | Elementos del prototipo rehabilitador de muñeca..... | 34 |
| 3.3 | Diseño del sistema rehabilitador de muñecas | 34 |
| 3.4 | Diseño de elementos | 35 |
| 3.4.1 | Diseño de elementos para el movimiento de Flexión-extensión..... | 35 |
| 3.4.1.1. | Diseño Estático de elementos mediante Simulación Computacional | 38 |
| 3.4.1.2. | Diseño Dinámico de elementos mediante Simulación Computacional..... | 41 |

| | | |
|-------------------|---|----|
| 3.4.2. | Diseño de elementos para el movimiento de Abducción – aducción..... | 42 |
| 3.4.2.1. | Diseño de elementos mediante Software Ansys | 45 |
| 3.4.2.2. | Diseño Dinámico de elementos mediante Simulación Computacional..... | 47 |
| 3.4.3. | Diseño de elementos para el movimiento de Pronación – Supinación..... | 48 |
| 3.4.3.1 | Diseño de elementos mediante Software Ansys | 51 |
| 3.4.3.2 | Diseño Dinámico de elementos mediante Simulación Computacional..... | 52 |
| 3.5 | Selección de servomotores..... | 54 |
| 3.6 | Diagrama Electrónico..... | 54 |
| CAPÍTULO IV | | 55 |
| 4. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 55 |
| 4.1 | Resultados | 55 |
| 4.1.1 | Plan de Pruebas. | 55 |
| 4.1.1.1 | Pruebas en vacío..... | 55 |
| 4.1.1.2 | Pruebas en vacío..... | 57 |
| 4.1.2 | Pruebas Mecánicas del prototipo exoesqueleto..... | 58 |
| 4.1.2.1 | Verificación del movimiento del prototipo exoesqueleto | 58 |
| 4.1.3 | Verificación de los requerimientos | 59 |
| 4.1.3.1 | Verificación de los requerimientos del usuario..... | 59 |
| 4.1.3.2 | Verificación del criterio del ingeniero | 60 |
| 4.2 | Discusión..... | 61 |
| CAPÍTULO V..... | | 62 |
| 5. | PROPUESTA | 62 |
| 5.1 | Introducción | 62 |
| 5.2 | Dimensiones..... | 62 |
| 5.3 | Construcción y montaje..... | 62 |
| 5.3.1. | Generalidades..... | 62 |
| 5.3.2. | Construcción | 63 |
| 5.3.2.1 | Componentes de la máquina | 63 |

| | | |
|-----------------------|---|----|
| 5.3.3 | Procedimiento de la construcción | 63 |
| 5.3.3.1 | Elementos de la construcción..... | 63 |
| 5.3.3.2 | Tiempos de construcción prototipo exoesqueleto. | 65 |
| 5.3.3.3 | Flujograma de construcción | 66 |
| 5.3.4 | Manufactura de los componentes del prototipo | 67 |
| 5.3.5 | Implementación del sistema de control..... | 68 |
| 5.3.6 | Montaje del prototipo exoesqueleto..... | 70 |
| 5.3.6.1. | Montaje de Impresión 3D..... | 70 |
| 5.3.6.2 | Montaje sistema motriz..... | 71 |
| 5.3.6.3. | Montaje sistema eléctrico..... | 72 |
| 5.3.7 | Flujograma de montaje de prototipo exoesqueleto. | 73 |
| 5.4 | Análisis de costos de prototipo exoesqueleto..... | 74 |
| 5.4.1 | Costos directos | 74 |
| 5.4.1.1 | Costos de materiales..... | 74 |
| 5.4.1.2 | Mano de obra | 75 |
| 5.4.1.3 | Equipos y Herramientas | 76 |
| 5.4.1.4 | Coste de Transporte..... | 76 |
| 5.4.1.5 | Costo total directo | 77 |
| 5.4.2 | Costos Indirectos..... | 77 |
| 5.4.3 | Costo Total..... | 78 |
| CONCLUSIONES | | 79 |
| RECOMENDACIONES | | 80 |
| GLOSARIO | | |
| BIBLIOGRAFIA | | |
| ANEXOS | | |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabla 1-2: | Masa, Volumen y gravedad específica de las partes del cuerpo | 13 |
| Tabla 2-2: | Caracterización del ácido poliláctico (PLA)..... | 15 |
| Tabla 3-2: | Caracterización de probetas ABS | 15 |
| Tabla 4-2: | S-N de membranas de PLA con 0% de Gr..... | 17 |
| Tabla 5-2: | Operacionalización de variable independiente..... | 18 |
| Tabla 6-2: | Operacionalización de variable dependiente..... | 19 |
| Tabla 7-2: | Matriz de consistencia..... | 20 |
| Tabla 8-3: | Pacientes que acuden a los centros de rehabilitación de Riobamba..... | 25 |
| Tabla 9-3: | Matriz QFD | 28 |
| Tabla 10-3: | Especificaciones técnicas del equipo rehabilitador..... | 29 |
| Tabla 11-3: | Selección más adecuada del prototipo rehabilitador | 32 |
| Tabla 12-3: | Alternativa adecuada del prototipo rehabilitador | 33 |
| Tabla 13-3: | Comparación de factores de seguridad carga estática y dinámica | 53 |
| Tabla 14-3: | Características de servomotor DS3220 PRO 30KG..... | 54 |
| Tabla 15-4: | Potencia de servomotores sin carga | 56 |
| Tabla 16-4: | Prueba de prototipo exoesqueleto sin carga | 57 |
| Tabla 17-4: | Prueba de prototipo exoesqueleto con carga..... | 58 |
| Tabla 18-4: | Resultados mecánicos de prototipo exoesqueleto | 59 |
| Tabla 19-4: | Verificación de los requerimientos del usuario..... | 60 |
| Tabla 20-4: | Verificación del criterio del ingeniero | 60 |
| Tabla 21-5: | Materiales que conforma la construcción del prototipo exoesqueleto..... | 63 |
| Tabla 22-5: | Elementos que conforma la construcción del prototipo exoesqueleto..... | 64 |
| Tabla 23-5: | Tiempos de construcción del prototipo exoesqueleto | 65 |
| Tabla 24-5: | Elementos que conforman el sistema eléctrico | 69 |
| Tabla 25-5: | Montaje de elementos impresos en 3D | 71 |
| Tabla 26-5: | Tiempo de montaje de elementos impresos en 3D | 71 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabla 27-5: | Tiempo de montaje sistema eléctrico | 72 |
| Tabla 28-5: | Tiempos de construcción y montaje | 74 |
| Tabla 29-5: | Costo de construcción del prototipo exoesqueleto | 75 |
| Tabla 30-5: | Mano de obra de construcción del prototipo exoesqueleto | 76 |
| Tabla 31-5: | Costo de equipos y herramientas para la construcción del prototipo exoesqueleto | 76 |
| Tabla 32-5: | Costo total directo para la construcción del prototipo exoesqueleto | 77 |
| Tabla 33-5: | Costo indirecto para la construcción del prototipo exoesqueleto..... | 77 |
| Tabla 34-5: | Costo total indirecto para la construcción del prototipo exoesqueleto | 78 |
| Tabla 35-5: | Costo total para la construcción del prototipo exoesqueleto..... | 78 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 1-2. | Pronación – Supinación..... | 7 |
| Figura 2-2. | Extensión – Flexión..... | 8 |
| Figura 3-2. | Aducción – Abducción..... | 9 |
| Figura 4-2. | Rehabilitación en paciente movimientos de flexión - extensión | 10 |
| Figura 5-2. | Rehabilitación en paciente movimientos de aducción - abducción | 11 |
| Figura 6-2. | Rehabilitación en paciente movimientos de pronación - supinación..... | 11 |
| Figura 7-2. | Antropómetro | 12 |
| Figura 8-3. | Diagrama función primaria del prototipo exosqueleto | 30 |
| Figura 9-3. | Diagrama de funciones secundarias del prototipo exoesqueleto | 30 |
| Figura 10-3. | Estructura modular | 31 |
| Figura 11-3. | Prototipo automático exoesqueleto para rehabilitación de la muñeca..... | 32 |
| Figura 12-3. | Unión de elementos y ubicación de fuerzas en Adams View..... | 35 |
| Figura 13-3. | Asignación de material en Adams View | 36 |
| Figura 14-3. | Asignación de peso de la mano en Adams View | 36 |
| Figura 15-3. | Asignación de grados máximos en Adams View para movimiento de flexión - extensión..... | 37 |
| Figura 16-3. | Potencia máxima requerida para flexión - extensión de rehabilitación en AdamsView | 37 |
| Figura 17-3. | Fuerza resultante del eje para flexión - extensión de rehabilitación en Adams View.. | 38 |
| Figura 18-3. | Análisis a 60° flexión - extensión..... | 38 |
| Figura 19-3. | Superficie media de elementos a 60° SpaceClaim | 39 |
| Figura 20-3. | Mallado y fuerzas en prototipo a 60° Ansys | 39 |
| Figura 21-3. | Deformación máxima en prototipo a 60° Ansys | 39 |
| Figura 22-3. | Factor de seguridad estático en prototipo a 60° Ansys..... | 40 |
| Figura 23-3. | Parametrización en prototipo a 60° | 40 |
| Figura 24-3. | Resultados de parametrización en prototipo a 60° | 41 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 25-3. | Diseño de prototipo caso dinámico a 60° | 41 |
| Figura 26-3. | Factor de seguridad dinámico en prototipo a 60° | 42 |
| Figura 27-3. | Uniones de elementos, fuerzas y motores en Adams View..... | 42 |
| Figura 28-3. | Asignación de peso de la mano en Adams View | 43 |
| Figura 29-3. | Asignación de grados máximos en Adams View para movimiento de aducción - abducción | 43 |
| Figura 30-3. | Potencia máxima requerida para aducción - abducción de rehabilitación en AdamsView | 44 |
| Figura 31-3. | Fuerza resultante del eje para aducción - abducción de rehabilitación en Adams View | 44 |
| Figura 32-3. | Análisis a 0° aducción - abducción | 45 |
| Figura 33-3. | Superficie media de elementos a 0° SpaceClaim | 45 |
| Figura 34-3. | Mallado y fuerzas en prototipo a 0° Ansys | 46 |
| Figura 35-3. | Deformación máxima en prototipo a 0° Ansys | 46 |
| Figura 36-3. | Factor de seguridad estático en prototipo a 0° Ansys..... | 46 |
| Figura 37-3. | Resultados de parametrización en prototipo a 0° | 47 |
| Figura 38-3. | Diseño de prototipo caso dinámico a 0° | 47 |
| Figura 39-3. | Factor de seguridad dinámico en prototipo a 0° | 48 |
| Figura 40-3. | Uniones de elementos, fuerzas y motores en Adams View..... | 48 |
| Figura 41-3. | Asignación de peso de la mano y antebrazo en Adams View | 49 |
| Figura 42-3. | Asignación de grados máximos en AdamsView para movimiento de pronación - supinación..... | 49 |
| Figura 43-3. | Potencia máxima requerida para pronación - supinación de rehabilitación en AdamsView | 50 |
| Figura 44-3. | Fuerza resultante del eje para pronación - supinación de rehabilitación en AdamsView | 50 |
| Figura 45-3. | Superficie media de elementos a 30° SpaceClaim | 51 |
| Figura 46-3. | Mallado y fuerzas en prototipo a 30° Ansys | 51 |
| Figura 47-3. | Deformación máxima en prototipo a 30° Ansys | 52 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 48-3. | Factor de seguridad estático en prototipo a 30° Ansys..... | 52 |
| Figura 49-3. | Diseño de prototipo caso dinámico a 30° | 53 |
| Figura 50-3. | Factor de seguridad dinámico en prototipo a 30° | 53 |
| Figura 51-3. | Diagrama electrónico | 54 |
| Figura 52-4. | Prototipo exoesqueleto rehabilitador de muñeca..... | 55 |
| Figura 53-4. | Voltaje e Intensidad de servomotores sin carga | 56 |
| Figura 54-5. | Dimensiones prototipo exoesqueleto rehabilitador de muñeca | 62 |
| Figura 55-5. | Flujograma de construcción general..... | 67 |
| Figura 56-5. | Configuración de parámetros impresión 3D..... | 67 |
| Figura 57-5. | Impresión 3D de elementos del prototipo | 68 |
| Figura 58-5. | Placa circuito eléctrico | 68 |
| Figura 59-5. | Componentes circuito eléctrico | 70 |
| Figura 60-5. | Pantalla LCD y teclado de prototipo | 70 |
| Figura 61-5. | Montaje de elementos impresos | 71 |
| Figura 62-5. | Montaje de motores | 72 |
| Figura 63-5. | Montaje de componentes eléctricos..... | 73 |
| Figura 64-5. | Flujograma de montaje del prototipo | 73 |
| Figura 65-5. | Prototipo exoesqueleto | 74 |

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PLANOS

ANEXO B: MANUAL DE OPERACIÓN

ANEXO C: PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON ARDUINO

ANEXO D: VALIDACIÓN DEL PROYECTO

RESUMEN

El objetivo fue el desarrollo de un prototipo automático de exoesqueleto con movimiento mecánico para la rehabilitación de la muñeca en personas adultas. Para el dimensionamiento del prototipo se obtuvo medidas antropométricas de personas adultas, para la realización del diseño se utilizó el software Adams View, que permitió analizar la cinemática y dinámica de cada uno de los movimientos que el especialista realiza en la rehabilitación de la muñeca en personas adultas. Mediante la simulación computacional con el software CAE, se realizó la validación de la resistencia estructural del prototipo tanto estáticamente y dinámicamente, evaluando deformaciones, esfuerzos mecánicos, así como factores de seguridad de los elementos del prototipo que garanticen un funcionamiento adecuado. De acuerdo a las pruebas realizadas se demostró que el prototipo es capaz de ejecutar los movimientos requeridos de manera precisa y segura, tal como se planteó en los objetivos del estudio, dando como resultado un error aceptable en el funcionamiento del prototipo del 1.8% en relación al ángulo asignado con el ángulo medido desde el punto de vista mecánico. Además, se validó el funcionamiento del prototipo exoesqueleto en personas adultas con una especialista en fisioterapia cumpliendo con los movimientos de flexión, extensión, aducción, abducción, pronación y supinación.

Palabras clave: <DISEÑO MECÁNICO>, <REHABILITADOR DE MUÑECA>, <ANÁLISIS CINEMÁTICO>, <ANÁLISIS COMPUTACIONAL>, <MEDIDAS ANTROPOMÉTRICAS>, <ANÁLISIS DINÁMICO>, <ANÁLISIS ESTÁTICO>



0108-DBRA-UPT-IPEC-2023

SUMMARY

The objective was to develop a prototype of an automatic exoskeleton with mechanical movement for adult wrist rehabilitation. For the sizing of the prototype, anthropometric measurements of adults were taken and for the design, Adams View software was used to analyze the kinematics and dynamics of each of the movements performed by the specialist in the rehabilitation of the adult wrist. Computer simulation using CAE software was used to validate the structural strength of the prototype, both statically and dynamically, evaluating the deformations, mechanical stresses and safety factors of the prototype's elements to ensure adequate functioning. The tests carried out showed that the prototype was capable of performing the required movements in a precise and safe manner, as defined in the study objectives, resulting in an acceptable error in the operation of the prototype of 1.8% in relation to the angle assigned to the angle measured from a mechanical point of view. In addition, the functioning of the prototype exoskeleton was validated on adults with a physiotherapist, performing the movements of flexion, extension, adduction, abduction, pronation and supination.

Keywords: <MECHANICAL DESIGN>, <DOLL REHABILITATOR>, <KINEMATIC ANALYSIS>, < COMPUTATIONAL ANALYSIS>, <ANALYSIS OF ANTHROPOMETRIC MEASUREMENTS>, <DYNAMIC ANALYSIS>, <STATISTIC ANALYSIS>.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

La siguiente investigación hace referencia al desarrollo de un prototipo destinado a la rehabilitación física de la muñeca después de una fractura mediante la aplicación de un sistema mecánico de exoesqueleto como una solución más ágil y efectiva al problema en el campo amplio de la terapia física actualmente en el Ecuador este tipo de rehabilitación no se proporciona en los centros de rehabilitación local debido a la falta de actualización y recursos en los mismos que forman parte del sector público mientras que los centros de tipo privado que ofrecen este tipo de rehabilitación tienen elevados costos por sesión provocando que no sea de acceso para las personas consideradas de medio y bajos recursos económicos provocando la demora en el proceso de rehabilitación e incapacidad parcial o total de la parte afectada. .

En el desarrollo del prototipo se busca generar los movimientos mediante un análisis de posición, velocidad, aceleración y un análisis de fuerza para la obtención de los torques necesarios que permitan seleccionar los motores adecuados para la elaboración del prototipo que contribuirán a generar los movimientos adecuados para la rehabilitación.

1.1 Planteamiento del problema

La muñeca es la articulación más compleja que existe en el cuerpo y está dentro de las partes más susceptibles a padecer algún tipo de ruptura por varios agentes causales. Las personas que se encuentran en edad adulta son las más afectadas por estas situaciones ocasionando daños que generalmente requieren cirugías y un largo proceso de rehabilitación para recuperar el total movimiento de la muñeca, produciendo un desgaste a nivel emocional y económico. En la ciudad de Riobamba los centros de rehabilitación a nivel público y privado no ofrecen un servicio automatizado que permitan una rehabilitación más eficaz y oportuna debido a que el costo de importación de los equipos rehabilitadores es muy elevado ya que a nivel nacional no se ha logrado establecer industrias dedicadas a la elaboración de equipos rehabilitadores que permita automatizar y tecnificar los servicios dedicados al área de salud con énfasis en equipos de rehabilitación.

1.1 Situación problemática

La fractura de la muñeca es una de las lesiones más comunes durante una caída cuando la persona accidentalmente cae con la mano extendida, en deportistas que practican el patinaje o en personas que padecen de osteoporosis. Esta problemática representa el 3% de todas las lesiones de extremidades superiores, por lo cual el tratamiento de las fracturas de muñeca en la actualidad ha mejorado de manera considerable por la utilización de la biomecánica para la rehabilitación y el

desarrollo de implantes que contrarrestan fuerzas y restauran la estabilidad de la muñeca. (Tratamiento quirúrgico de las fracturas de muñeca, 2011, p98)

En Ecuador representa la sexta parte de las fracturas que se atienden en una consulta de traumatología. El tipo más frecuente de fracturas tratadas la fractura de tipo Cooney 3 y 4 su tratamiento es quirúrgico con placa en T, la complicación más frecuente es la dehiscencia de sutura y la rehabilitación post quirúrgica. (Trelles, 2015, p35)

1.3 Formulación del Problema

El no existir un prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva para simular movimientos mecánicos en la rehabilitación de las muñecas en personas adultas.

1.4. Preguntas directrices o específicas de la investigación

¿Para qué sirve la investigación?

La investigación servirá para desarrollar un prototipo automático de exoesqueleto con movimiento mecánico para la rehabilitación de la muñeca en personas adultas.

¿Qué resultados se espera obtener?

Que cumpla con todos los requerimientos que el usuario requiere para la rehabilitación de la muñeca.

¿Por qué es importante la investigación?

El tema planteado pretende mejorar el proceso de rehabilitación de las muñecas tras sufrir algún tipo de lesión.

¿Cuál es el aporte a la comunidad?

Los centros de rehabilitación de la localidad puedan adquirir el prototipo exoesqueleto a bajos costos y realizar una rehabilitación de la muñeca de una manera más eficiente, obteniendo la satisfacción del paciente.

1.5 Justificación de la Investigación

La falta de desarrollo de un prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva para simular movimientos mecánicos en la rehabilitación de las muñecas en personas adultas. Al finalizar la investigación se espera obtener un prototipo que permita simular los movimientos realizados en la rehabilitación de la muñeca de una manera más técnica. Luego del desarrollo del proyecto y la implementación de la misma en los centros de rehabilitación local a largo plazo se busca que los beneficiarios sean los pacientes de medianos y escasos recursos económicos que requieran rehabilitación, permitiendo ofrecer además una diversidad de terapias dependiendo las lesiones sufridas por el paciente, lo cual permitirá reincorporarse a sus actividades cotidianas en un menor tiempo, así como también mejorar su calidad de vida. La investigación proporcionará un desarrollo tecnológico en el campo de la biomecánica a nivel local y crear una máquina con diseño y manufactura ecuatoriana.

1.6 Objetivo general

Desarrollar un prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva para simular movimientos mecánicos en la rehabilitación de las muñecas en personas adultas.

1.7 Objetivos Específicos

Establecer la cinemática y dinámica de los movimientos que generará el prototipo exoesqueleto en la rehabilitación de la muñeca.

Realizar la simulación computacional mediante software CAE para validar la resistencia estructural y la verificación de movimientos.

Prototipar el exoesqueleto mediante la manufactura aditiva con el uso de PLA.

Realizar el protocolo de pruebas para validar el control y movimientos del prototipo en vacío y con carga.

1.8. Hipótesis

1.8.1 Hipótesis General

El Desarrollo de un prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva permitirá simular los movimientos mecánicos para la rehabilitación de las muñecas en personas adultas.

1.8.2 Hipótesis Específicas

Si se logrará Establecer la cinemática y dinámica de los movimientos que generará el prototipo exoesqueleto en la rehabilitación de la muñeca.

La Realización la simulación computacional mediante software CAE si permitirá validar la resistencia estructural y la verificación de movimientos.

Si conseguirá Prototipar el exoesqueleto mediante la manufactura aditiva con el uso de PLA.

La Realización el protocolo de pruebas si permitirá validar el control y movimientos del prototipo en vacío y con carga.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

“MODELACIÓN DE UN PROTOTIPO REHABILITADOR DE MUÑECAS PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD MOTRIZ”

El presente trabajo manifiesta sobre la caracterización de un prototipo electromecánico rehabilitador que brinda aporte a la medicina mediante las terapias activas aplicado a pacientes con discapacidad. Mediante el Software SolidWorks se modela el mecanismo tomando en cuenta la antropometría del cuerpo humano y mediante la manufactura aditiva mediante filamento PLA seleccionado por sus excelentes propiedades mecánicas se realiza la estructura del prototipo, en la fase de programación mediante Arduino y el movimiento mecánico mediante motores de corriente directa de 6V, permitiendo lograr los movimientos requeridos para la rehabilitación. (Sailema, 2021, p78)

“DISEÑO DE UN REHABILITADOR PARA MUÑECA”

En este artículo manifiesta sobre el diseño e implementación de un dispositivo para la rehabilitación pasiva de la muñeca con tres grados de libertad para obtener los movimientos de la rehabilitación de la muñeca. La investigación se basa en el estudio de la biomecánica de la muñeca, la antropometría de las personas y la cinemática. El diseño utiliza un sistema de control simple con retroalimentación para posicionamiento inicial, además interactúa con el usuario mediante una aplicación Android de fácil operación mediante un dispositivo móvil el cual almacena información del paciente, permitiendo el movimiento de la muñeca. La validación del dispositivo se realiza mediante un análisis de elementos finitos la cual permite obtener una solución aproximada de cómo se comportaría el modelo real. Mediante microcontroladores permitirá que el dispositivo realice diferentes acciones, así como actuadores, sensores e indicadores. (Diseño de un rehabilitador para muñeca, 2017, pp 45-50)

“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO AUTOMÁTICO PARA REHABILITACIÓN DE MUÑECA CON 2 GRADOS DE LIBERTAD”

El presente trabajo manifiesta que el rehabilitador permite realizar rutinas de rehabilitación de movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción de la muñeca. El diseño del mecanismo parte de 2 grados de libertad, mediante el software Adams View se simula los movimientos para la rehabilitación, así como con el software Autodesk Inventor se modela los elementos del prototipo, para la construcción se realiza por medio de la impresión 3D. Además, la incorporación

de dispositivos electrónicos, servomotores y controladores por la tarjeta Arduino que realizan los movimientos de forma automática. El prototipo permite realizar rutinas de rehabilitación controlada en varios pacientes con diferentes lesiones. (Cárdenas, 2018, pp 36-40)

“DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE REHABILITACIÓN PARA LA ARTICULACIÓN DE MUÑECA DESDE EL ENFOQUE DE LA INGENIERÍA CONCURRENTE”

El artículo manifiesta que el rehabilitador para la articulación de muñeca posee 2 grados de libertad, el desarrollo se basa mediante siete fases de diseño entre las que se tiene: Identificación de las necesidades, Especificación de los requerimientos de diseño, Diseño conceptual del dispositivo de rehabilitación, Diseño preliminar e ingeniería básica, Diseño final e ingeniería de detalle, Desarrollo del programa controlador, Construcción del prototipo conceptual del dispositivo de rehabilitación. Incorpora la antropometría de la persona, así como el tipo de lesión de la muñeca para la rehabilitación. En su construcción se usa impresión 3D con filamento PLA los cuales fueron diseñados en el software Autodesk Inventor, para la selección de los motores actuadores se realizaron análisis cinemáticos y cinéticos, obteniendo valores de torque mínimo de funcionamiento de 184 Mmm. Para el análisis estructural se realizó la simulación de manera estática mediante el software Autodesk Inventor obteniendo valores de seguridad por encima de 1.74, lo cual indica que no hay fallas por deformación plástica. (Diseño de un Dispositivo de Rehabilitación para la Articulación de Muñeca desde el Enfoque de la Ingeniería Concurrente, 2017, pp 56-64)

2.2 Bases teóricas

Para el desarrollo del prototipo exoesqueleto es necesario conocer: Mecanismos, flexión, extensión, abducción, aducción, pronación, supinación, prototipo automático de exoesqueleto, fuerzas dinámicas, rotación, selección del material más adecuado para la fabricación del prototipo y la automatización del rehabilitador para que cumpla con los movimientos necesarios.

2.2.1 Mecanismos y Máquinas

Un mecanismo es un dispositivo que transforma el movimiento en un patrón deseable, un medio de transmisión, control o restricción del movimiento relativo, trabajan a velocidades bajas considerándose como dispositivos cinemáticos. Entiéndase como máquina al conjunto de mecanismos que producen y transmiten fuerzas significativas, para su estudio se deben tratar como mecanismos, sus velocidades y aceleraciones analizadas cinemáticamente, para luego analizar como sistema dinámico en las que sus fuerzas estáticas y dinámicas son analizadas mediante la cinética. (Norton, 2013, p246)

2.2.2 La Muñeca y sus movimientos

Los movimientos de muñeca son usados por los seres humanos con mucha frecuencia en nuestro diario vivir para realizar cualquier tipo de actividad, la cinemática de la muñeca para el movimiento humano estándar generalmente se generaliza en 2 grados de Libertad (DoF). (Kutuk, 2019, p198)

Para el proceso de la rehabilitación de la muñeca se consideran los movimientos de Flexión – extensión, Abducción – aducción y pronación – supinación.

2.2.2.1 Pronación – Supinación

Es un movimiento que se produce a nivel del codo, de la membrana interósea y de la muñeca. El paciente debe de estar sentado, hombro en posición 0, codo flexionado en 90° para evitar la rotación del hombro, antebrazo y muñeca en posición 0.

Alineación del goniómetro:

Goniómetro universal en 0°.

Eje: para la supinación, toma como reparo la apófisis estiloides cubital, y para la pronación, la apófisis estiloides radial.

Brazo fijo: se alinea paralelo a la línea media longitudinal del húmero, por fuera para la pronación y por dentro para la supinación.

Brazo móvil: para la supinación, se alinea con la cara palmar del antebrazo, para la pronación, con la cara dorsal del antebrazo.

Movimiento: se realizan la pronación y la supinación del codo. El brazo móvil del goniómetro acompaña el movimiento.

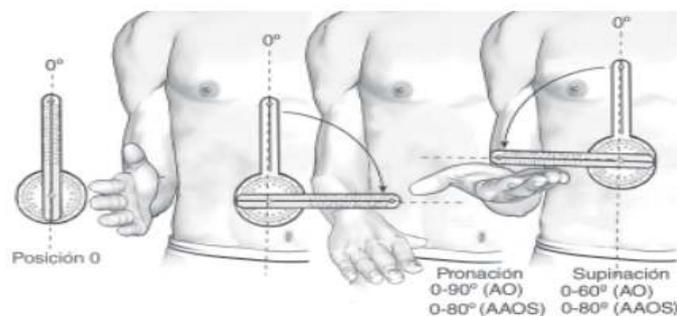


Figura 1-2. Pronación – Supinación

Fuente: (Taboadela, 2007).

Registro: se registra el ángulo formado entre la posición 0 y la posición final de pronación y supinación.

Valores normales:

Supinación: 0-60° (AO) y 0-80° (AAOS)

Pronación: 0-90° (AO) y 0-80° (AAOS)

2.2.2.2 Flexión - extensión

Posición: paciente sentado, antebrazo en pronación apoyado sobre una mesa.

Alineación del goniómetro:

Goniómetro universal en 0°.

Eje: colocado sobre la proyección del hueso piramidal (borde cubital de la muñeca, ligeramente por delante de la apófisis estiloides cubital).

Brazo fijo: se alinea con la línea media longitudinal del cúbito. Brazo móvil: se alinea con la línea media longitudinal del quinto metacarpiano.

Movimiento: se practican la flexión y la extensión de la muñeca. El brazo móvil del goniómetro acompaña el movimiento.

Registro: se registra el ángulo formado entre la posición 0 y la posición final de flexión y extensión.

Valores normales:

Flexión: 0-50°/60° (AO) y 0-80° (AAOS).

Extensión: 0-35°/60° (AO) y 0-70° (AAOS).

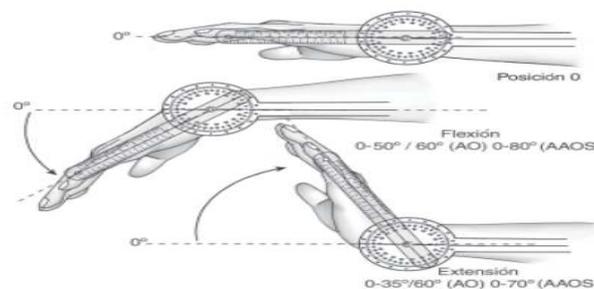


Figura 2-2. Extensión – Flexión

Fuente: (Taboadela, 2007).

2.2.2.3 Abducción – aducción

Posición: paciente sentado, antebrazo en pronación apoyado sobre una mesa.

Alineación del goniómetro:

Goniómetro universal en 0°.

Eje: colocado sobre la proyección superficial del hueso grande (eminencia ósea palpable entre la base del tercer metacarpiano y el radio).

Brazo fijo: se alinea con la línea media longitudinal del antebrazo tomando como reparo óseo el epicóndilo.

Brazo móvil: se alinea con la línea media de la mano que corresponde a la línea media longitudinal del tercer metacarpiano.

Movimiento: se procede a realizar la desviación radial y cubital de la muñeca. El brazo móvil del goniómetro acompaña el movimiento.

Registro: se registra el ángulo formado entre la posición 0 y la posición final de desviación radial y cubital.

Valores normales:

Abducción: 0-25°/30° (AO), 0-20° (AAOS).

Aducción: 0-30°/40° (AO), 0-30° (AAOS).

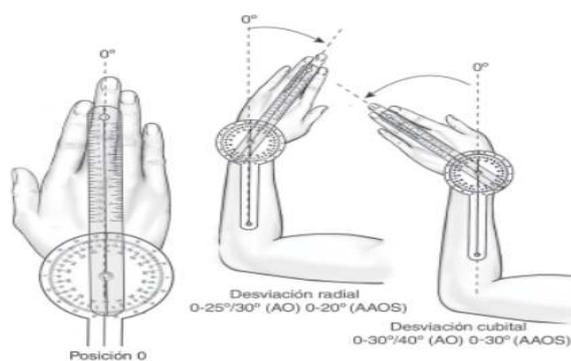


Figura 3-2. Aducción – Abducción.

Fuente: (Taboadela, 2007).

2.2.3 Fases de la Rehabilitación

La rehabilitación de la muñeca en un centro especializado se realiza mediante la valoración del paciente, en donde el especialista indica cual es la rutina más adecuada para cada persona. El número de repeticiones de movimientos de la muñeca en una sesión de rehabilitación va a depender mucho de la etapa de recuperación en la que el paciente se encuentre.

Los movimientos manuales de la muñeca que el especialista realiza son los siguientes:

2.2.3.1 Movimiento de Flexión – Extensión.

El especialista sujeta el antebrazo con la una mano y con la otra mano procede a dar el movimiento a la muñeca de arriba hacia abajo, realizando este movimiento por diez repeticiones. Cabe mencionar que la velocidad de la rutina y el ángulo del movimiento va a depender mucho del grado de dolor que sienta el paciente.



Figura 4-2. Rehabilitación en paciente movimientos de flexión - extensión

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

2.2.3.2 Movimiento de Aducción – Abducción.

El especialista sujeta el antebrazo con la una mano y con la otra mano procede a dar el movimiento a la muñeca de izquierda a derecha, realizando este movimiento por diez repeticiones. Cabe mencionar que la velocidad de la rutina y el ángulo del movimiento va a depender mucho del grado de dolor que sienta el paciente.



Figura 5-2. Rehabilitación en paciente movimientos de aducción - abducción

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

2.2.3.3 Movimiento de Pronación - Supinación.

El especialista sujeta el antebrazo con la una mano y con la otra mano procede a dar el movimiento a la muñeca de forma circular, realizando este movimiento por diez repeticiones. Cabe mencionar que la velocidad de la rutina y el ángulo del movimiento va a depender mucho del grado de dolor que sienta el paciente.



Figura 6-2. Rehabilitación en paciente movimientos de pronación - supinación

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

2.2.4 Antropometría humana

Es la ciencia que estudia las dimensiones del cuerpo humano, en particular las medidas de las mismas. El término antropometría proviene de los vocablos griegos anthropos que significa hombre y metrikos que significa medida.

Las medidas antropométricas varían dependiendo de la población entre los siguientes factores: género, edad, origen étnico, condición socioeconómica. (Barrera, 2013, p76)

Es el estudio del tamaño, proporción, maduración, forma y composición corporal con el fin de establecer las características físicas, evaluar y monitorear el crecimiento, nutrición y los efectos de la actividad física. (Ortiz, 2018, p32)

2.2.4.1 Longitud Codo a la punta de los dedos en posición sentado

Es la medida de referencia entre la parte inferior del codo hasta la punta del dedo medio. La medida de referencia en áreas de trabajo normales como escritorio, teclados.

Mediante un antropómetro se realiza la medición de un punto a otro, la escala está en centímetros y milímetros.

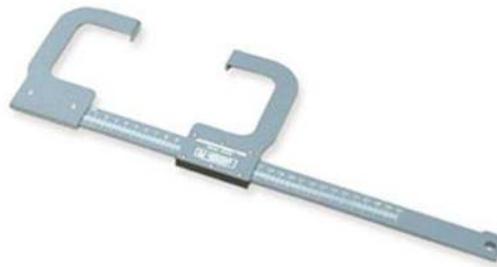


Figura 7-2. Antropómetro

Fuente: (Barrera, 2013)

La longitud codo – mano de personas de género masculino en Ecuador está en el rango de 44,56 a 47,76 centímetros, mientras que la longitud codo – mano de personas de género femenino está en el rango de 39,84 a 43,83 centímetros mediante un estudio realizado en la Universidad San Francisco de Quito con título Comparación estadística de medidas antropométricas entre mestizos, indígenas y afro ecuatorianos de la región Sierra del Ecuador. (Barrera, 2013, p68)

La longitud de la mano de personas de género masculino está en el rango de 16 a 21,5 centímetros, mientras que la longitud de la mano de personas de género femenino está en el rango de 15 a 19,6

centímetros mediante un estudio realizado en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador con título EVALUACIÓN ANTROPOMÉTRICA DE MANOS EN ESTUDIANTES DE LA CARRERA DE TERAPIA FÍSICA DE LA PUCE PARA LA ELABORACIÓN DE UNA BASE DE DATOS ANTROPOMÉTRICA DE MANO APLICADA EN EL REDISEÑO DE UN EXOESQUELETO. (Ortiz, 2018, pp 64-78)

2.2.5 Peso mano y antebrazo del cuerpo humano

El peso aproximado de la mano del ser humano se calcula mediante la siguiente expresión. (Clauser, 1969, pp 122-135)

$$M_{\text{mano}} = 0,703\% \text{ de la masa total del individuo}$$

El peso aproximado del antebrazo del ser humano se calcula mediante la siguiente expresión.

$$M_{\text{antebrazo}} = 1.818\% \text{ de la masa total del individuo}$$

Tabla 1-2: Masa, Volumen y gravedad específica de las partes del cuerpo

| Segmento | Sexo | Edad | Peso (gramos) | Volumen (cm3) | Gravedad específica |
|---------------------|------|------|---------------|---------------|---------------------|
| Antebrazo derecho | M | 30 | 821 | 402,2 | 1,1034 |
| Antebrazo derecho | F | 20 | 725,6 | 671,6 | 1,0804 |
| Antebrazo izquierdo | M | 30 | 770,1 | 692,1 | 1,1127 |
| Mano derecha | M | 30 | 393,2 | 354,3 | 1,1191 |
| Mano derecha | F | 20 | 316,8 | 283,7 | 1,1163 |
| Mano izquierda | M | 30 | 374 | 334,5 | 1,1178 |

Fuente: (Clauser, 1969, p129)

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

2.2.6 Exoesqueleto

Es el esqueleto externo y denominados en bioingeniería aplicada como ortesis activas. Son mecanismos estructurales externos acoplados a las personas han sufrido algún tipo de lesión y no pueden mover de manera correcta sus articulaciones permitiendo así transferir potencia mecánica como señales de información. (Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación, 2020, p37)

Es una estructura que se acoplan a las extremidades del cuerpo humano que ayudan a incrementar la fuerza, velocidad y rendimiento. El objetivo principal es de recuperar el movimiento de pacientes que han sufrido algún tipo de lesión, permitiendo que la persona vuelva a obtener su movilidad diaria. (Ortiz, 2018, p73)

Las interacciones cognitivas y físicas de un exoesqueleto con la persona son intensa, así como la cadena cinemática es correlacionada con la anatomía del miembro humano, existiendo una correspondencia entre las articulaciones anatómicas humanas y el conjunto de articulaciones del robot. El cumplimiento cinemático es importante para la interfaz ergonómica robot – hombre.

Mediante el exosqueleto se multiplica la fuerza actuando como un dispositivo de carga, mientras el paciente solo aplica una fuerza menor, su aplicación se da cuando el paciente tiene una debilidad o pérdida de función del miembro humano, por lo tanto, el exoesqueleto complementa o reemplaza la función del musculo esquelético.

La cinemática es importante en la función de un exoesqueleto ya que, si no son cinemáticamente compatibles, aparecen fuerzas de iteración no ergonómicas, a su vez la rehabilitación ha ganado gran espacio en el desarrollo de prototipos exoesqueletos debido a las lesiones provocadas por caídas. (Mendez, 2017, p47)

2.2.7 Materiales de prototipos exoesqueletos

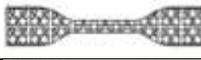
En la fabricación de prototipos exoesqueletos se usan materiales como el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y el PLA (Poly Lactic Acid), mediante la extrusión de filamento formando capas delgadas que crean modelos sólidos en tres dimensiones utilizando una impresora 3D. Ambos materiales poseen características y acabados diferentes. (Prototipo de mano robótica inspirada en la mano humana, 2016, pp 23-30)

2.2.7.1 Ácido poliláctico (PLA)

Es un polímero biodegradable que se fabrica a partir de recursos renovables al 100%, teniendo características equivalentes o mejores a los derivados del petróleo, el módulo de elasticidad es comparable al del polietileno, su inflamabilidad es baja.

El PLA tiene una temperatura de extrusión de 180 °C a 200°C y un precalentamiento de cama entre 60°C a 80°C. (Osejos, 2016, p24)

Tabla 2-2: Caracterización del ácido poliláctico (PLA)

| Tipo de configuración | Pruebas Mecánicas | | |
|---|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | Resistencia a la Fluencia (MPa) | Resistencia a la Flexión (MPa) | Módulo de Elasticidad (MPa) |
|  | 57,0 | 73,32 | 1112,6 |
|  | 41,2 | 65,50 | 1120,0 |
|  | 40,1 | 61,78 | 1100,0 |
|  | 46,6 | 68,80 | 1230,0 |
|  | 44,2 | 67,90 | 1200,0 |
|  | 36,4 | 58,50 | 942,0 |

Fuente: (Osejos, 2016)

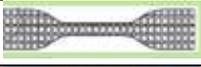
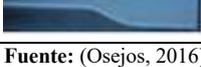
Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

2.2.7.2 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Tiene buenas propiedades ingenieriles como resistencia mecánica, resistencia al impacto combinado, facilidad de procesado.

El ABS tiene una temperatura de extrusión de 220 °C a 260°C y un precalentamiento de cama entre 100°C a 110°C. (Osejos, 2016, p30)

Tabla 3-2: Caracterización de probetas ABS

| Tipo de configuración | Pruebas Mecánicas | | |
|---|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | Resistencia a la Fluencia (MPa) | Resistencia a la Flexión (MPa) | Módulo de Elasticidad (MPa) |
|  | 35,1 | 33,7 | 905,0 |
|  | 30,7 | 31,3 | 788,4 |
|  | 28,6 | 29,6 | 801,0 |
|  | 27,0 | 29,3 | 798,0 |
|  | 28,9 | 31,5 | 818,0 |
|  | 22,5 | 27,5 | 610,0 |

Fuente: (Osejos, 2016)

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

2.2.8 Selección de materiales para prototipos exoesqueletos

Mediante la adecuada selección del material se garantiza el correcto funcionamiento del mecanismo del exoesqueleto, mediante una manufactura aditiva con el uso de ABS en función a los esfuerzos que soporta.

La estructura mecánica del exoesqueleto debe cumplir con las características dimensionales y funcionales del paciente. Mediante la impresión 3D se realiza el prototipo de piezas de una manera más rápida mediante el modelado por deposición fundida, en el cual se obtiene piezas a escala real diseñadas en un software CAD mediante la extrusión del plástico a una determinada temperatura. (Mendez, 2017, pp 23-25)

Mediante una selección adecuada del material para el prototipo exoesqueleto se reducirá de manera considerable los costos de manufactura ya que permite tener datos más reales y precisos sobre los movimientos. Lo cual permite al diseñador crear un rehabilitador con materiales quirúrgicos.

2.2.9 Fuerzas dinámicas en Materiales

Es la capacidad de desplazar una máxima carga a través del recorrido articular completo teniendo como resultado del análisis dinámico del movimiento debido a las Inercias y aceleraciones. (Champi, 2020, p56)

2.2.9.1 Propiedades Mecánicas

En la investigación Simulación de análisis mecánicos de membranas electrohiladas de ácido poliláctico (PLA) con grafeno, realiza la gráfica S – N la cual permite conocer la vida útil de los materiales y su comportamiento frente a cargas fluctuantes. (Castañeda, 2020, p66).

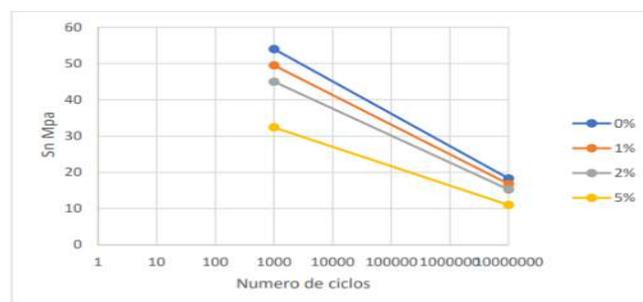


Gráfico 1-2. S-N de membranas de PLA con Gr

Fuente: (Castañeda, 2020)

Tabla 4-2: S-N de membranas de PLA con 0% de Gr

| Sn MPa | Número de Ciclos |
|--------|------------------|
| 54 | 1000 |
| 18.31 | 10000000 |

Fuente: (Castañeda, 2020)

Realizado por: Guerrero Javier, 2023

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 La automatización

Es la transferencia de tareas realizadas por personas a un conjunto de elementos tecnológicos. La parte operativa hace que el mecanismo se mueva y realice los movimientos deseados para la rehabilitación de la muñeca, mientras que la parte de mando es la tecnología programable como los relés, Rasbepi, Arduino, tarjetas electrónicas, entre otros y debe estar en comunicación con todos los elementos del sistema.

2.3.2 Placa Arduino Mega

Es un controlador que se puede programar y desarrollar elementos autónomos o a su vez usarlos como una memoria de información, el Arduino usa una plataforma de código abierto.

2.3.3 Servomotores

Son motores DC capaces de controlar la posición, tienen un giro de 180°, es decir no dan la vuelta completa los cuales son llamados servomotores de rango de giro limitado. La principal característica de los servomotores es que el funcionamiento se basa en la modulación PWM, es decir emite señales por pulsos de frecuencia constante.

2.4. Identificación de variables

Variable independiente: Prototipo automático de exoesqueleto

Variable dependiente: Movimiento Mecánico

2.5 Operacionalización de variables

Tabla 5-2: Operacionalización de variable independiente

| VARIABLE INDEPENDIENTE | CONCEPTUALIZACIÓN | DIMENSIONES | INDICADORES | DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES | CRITERIO DE MEDICIÓN | TÉCNICA | INSTRUMENTO | ESCALA |
|--------------------------------------|---|--|--|--|--|--|-------------------|--------|
| Prototipo automático de exoesqueleto | Es una estructura de esqueleto exterior que apoya y da fuerza a los movimientos del cuerpo humano mediante la fuerza mecánica, a esto se suma la aplicación manufactura aditiva el cual mediante la fundición de materiales se construye las piezas para la realización de prototipos sobre todo en el ámbito de la medicina. | Fuerzas dinámicas de los elementos del mecanismo | Torques generados en los motores | Son el resultado del análisis dinámico del movimiento debido a las Inercias y aceleraciones | Curvas de fuerzas dinámicas | Experiment al mediante simulación en Software | Adams Multímetro | 1:1 |
| | | Rotaciones generadas por el exoesqueleto | Angulos de flexión, extensión, abducción, aducción | Los angulos se obtienen del análisis cnemático del mecanismo | Curvas del análisis cinemático del mecanismo | Experiment al mediante simulación en Software | Adams Goniometro | |
| | | Selección del material para impresión 3D | La resistencia a mecánica de los materiales | En función a los esfuerzos que soorta el mecanismo | Caracterización del material | Experiment al, ensayos de tracción, compresión y flexión | Máquina Universal | |
| | | Automatización | Velocidad | La rapidez con q se realizara cada movimiento de rehabilitación de acuerdo al tipo de lesión | Diseño del control | Contol PID | Arduino | |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

Tabla 6-2: Operacionalización de variable dependiente

| VARIABLE DEPENDIENTE | CONCEPTUALIZACIÓN | DIMENSIONES | INDICADORES | DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES | CRITERIO DE MEDICIÓN | TÉCNICA | INSTRUMENTO | ESCALA |
|----------------------|--|-------------|-------------|---|---|---------------------------|------------------|--------|
| Movimiento mecánico | El rango de movimiento es la abertura angular que pueden alcanzar la articulación sin sufrir daño alguno, estos valores varían dependiendo de la posición de la mano, en este caso se referencian los datos a partir de una posición neutra. Estos movimientos tienen diferentes límites de acuerdo con el tipo de movimiento. (G. Mosquera, 2019) | Flexión | Posición | Es la inclinación de la palma de la mano hacia la cara anterior del antebrazo | 0 – 50° / 60° (AO) y de 0 – 80° (AAOS). | Simulación y experimental | Adams Goniometro | 1:1 |
| | | Extensión | Posición | Aproxima la cara dorsal de la mano hacia el dorso del antebrazo | 0 – 35° / 60° (AO) y de 0 – 70° (AAOS). | Simulación y experimental | Adams Goniometro | |
| | | Abducción | Posición | La mano se desplaza hacia la apófisis estiloides del radio en dirección al pulgar | 0 – 25° / 30° (AO), 0 – 20° (AAOS). | Simulación y experimental | Adams Goniometro | |
| | | Aducción | Posición | Es la flexión de la mano hacia la apófisis estiloides del cúbito | 0 – 30° / 40° (AO), 0 – 30° (AAOS). | Simulación y experimental | Adams Goniometro | |
| | | Pronación | Posición | El antebrazo gira hacia dentro llevando la palma de la mano hacia abajo | 0 – 80° | Simulación y experimental | Adams Goniometro | |
| | | Supinación | Posición | El antebrazo gira hacia fuera llevando la palma de la mano hacia arriba | 0 – 80° | Simulación y experimental | Adams Goniometro | |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

2.6 Matriz de consistencia

Tabla 7-2: Matriz de consistencia

| FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | OBJETIVO GENERAL | HIPÓTESIS | VARIABLES | INDICADORES | TÉCNICAS | INSTRUMENTOS |
|---|---|--|---|--|---|-------------------------------------|
| La falta de desarrollo de un prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva para simular movimientos mecánicos en la rehabilitación de las muñecas en personas adultas. | Desarrollar un prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva para simular movimientos mecánicos en la rehabilitación de las muñecas en personas adultas. | El Desarrollo de un prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva si permitirá simular movimientos mecánicos en la rehabilitación de las muñecas en personas adultas. | V Ind. Prototipo automático de exoesqueleto | Fuerzas dinámicas de los elementos del mecanismo | Simulación y experimental | Matlab Adams Multímetro |
| | | | | Rotaciones generadas por el exoesqueleto | Experimental mediante simulación en Software | Matlab Adams Goniómetro |
| | | | | Selección del material para impresión 3D | Experimental, ensayos de tracción, compresión y flexión | Máquina Universal / Investigaciones |
| | | | | Automatización | Control PID | Arduino |
| | | | V. Dep. Movimiento Mecánico | Flexión | Simulación y experimental | Matlab Adams Goniómetro |
| | | | | Extensión | Simulación y experimental | Matlab Adams Goniómetro |
| | | | | Abducción | Simulación y experimental | Matlab Adams Goniómetro |
| | | | | Aducción | Simulación y experimental | Matlab Adams Goniómetro |
| | | | | Pronación | Simulación y experimental | Matlab Adams Goniómetro |
| | | | | Supinación | Simulación y experimental | Matlab Adams Goniómetro |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

Los centros de rehabilitación están en constante proceso de innovación para brindar una mejor atención a los pacientes que presentan algún tipo de lesión en la muñeca y permita su recuperación con equipos modernos y funcionales.

La precisión de movimientos, la comodidad del paciente mientras realiza la rehabilitación y la disminución de tiempo son factores fundamentales que permitirán alcanzar los objetivos del equipo, y como todo arte se encamina a un objetivo el cual es tecnificar la rehabilitación cuando se presenten lesiones de la muñeca en las personas adultas. En el mercado local no existe un equipo para la rehabilitación debido a la falta de inversión de los centros de rehabilitación del sector público y la poca tecnificación que existe en el sector privado. Al diseñar y construir se busca atraer al paciente a la utilización del equipo elaborado con gran precisión en los movimientos lo cual garantizará al cliente satisfacción al realizar las sesiones de rehabilitación.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Metodología de la investigación

3.1.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación puede clasificarse de dos tipos: aplicada y cuasi-experimental

- Investigación aplicada: Tiene como objetivo resolver un problema específico basándose en la búsqueda del conocimiento para una determinada aplicación como el desarrollo científico.
- Investigación Cuasi – Experimental: Es aquella que tiene como objetivo poner a prueba una hipótesis causal manipulando una variable independiente donde por razones logísticas o éticas no se puede asignar las unidades de investigación aleatoriamente a los grupos.

3.1.2. Métodos de investigación

Para el proyecto de tesis se utilizaron los siguientes métodos de investigación

3.1.2.1. Método analítico

Es un procedimiento que descompone un todo en sus elementos básicos y, por tanto, que va de lo general a lo específico. Se lo utilizará para estudiar lo referente a la cinemática y dinámica de los movimientos que generará el prototipo exoesqueleto en la rehabilitación de la muñeca.

3.1.2.2. Método deductivo

Procedimiento de investigación que utiliza un tipo de pensamiento que va desde un razonamiento más general y lógico, basado en leyes o principios, hasta un hecho concreto. Se lo utilizará para validar la resistencia estructural y la verificación de movimientos.

3.1.2.3. Método científico

Implica el diseño de técnicas de ensayo y verificación aceptadas por la comunidad científica como válidas. Se lo utilizará para validar el control y movimientos del prototipo en vacío y con carga.

3.1.3 Enfoque de la investigación

El enfoque de esta investigación es cuantitativo y cualitativo, ya que se requiere recolectar datos para ser analizados e interpretados, se requiere de procesos metódicos y empíricos para tener un

conocimiento, es posible realizar experimentos y obtener resultados a partir de la hipótesis. Los resultados obtenidos son mediante estadística.

3.1.4. Alcance de la investigación

El alcance para esta investigación es explicativo, ya que se busca explicar la cinemática y dinámica de los movimientos que generará el prototipo exoesqueleto en la rehabilitación de la muñeca, mediante la recolección de datos y pruebas para la validación del equipo.

3.1.5 Población de estudio

La población de estudio para el desarrollo del prototipo exoesqueleto será para personas adultas de la Ciudad de Riobamba.

3.1.6 Unidad de análisis

Mediante la evaluación de los movimientos el prototipo exoesqueleto construido con manufactura aditiva debe realizar los movimientos adecuados para la rehabilitación de la muñeca.

3.1.7 Selección de la muestra

Para el presente trabajo de investigación se aplicará la muestra por conveniencia a los siete centros con más prestigio de la Ciudad de Riobamba que tuvieron la apertura para la investigación.

3.1.8. Tamaño de la muestra

Se realizará un muestreo aleatorio donde se escogió los centros de rehabilitación con disposición de participar en la investigación experimental obteniéndose un total de siete establecimientos de salud tanto públicos y privados

3.1.9 Técnicas de recolección de datos primarios y secundarios

- Investigaciones Previas
- Simulación en Software computacional

- Construcción de prototipo exoesqueleto para rehabilitación de la muñeca
- Validación del prototipo exoesqueleto por una especialista en fisioterapia

3.1.10 Instrumentos para procesar datos recopilados

Utilización de software CAD/CAE, Encuestas, Microsoft Excel

3.2 Desarrollo de un prototipo automático de exoesqueleto con movimiento mecánico para la rehabilitación de la muñeca en personas adultas

3.2.1 Introducción

El desarrollo del prototipo exoesqueleto mediante será mediante análisis de algunos prototipos y equipos existentes, además el estudio de campo permite tener una idea de cómo dimensionar el prototipo de exoesqueleto y los requerimientos del mercado, el cual se determinará en base a un estudio de la antropometría de la muñeca, así como de los diferentes tipos de movimientos que son necesarios para la rehabilitación de muñeca en las personas adultas de la ciudad de Riobamba.

3.2.2. Parámetros de diseño

Para determinar los parámetros de diseño se parte de la demanda que existe en los centros de rehabilitación, con respecto a problemas de lesiones de la muñeca.

Para lo cual se visita los centros de rehabilitación de la ciudad de Riobamba para conocer si disponen de un equipo que ayude a la rehabilitación de la muñeca y saber diariamente cuantos pacientes atienden con este tipo de problemas.

Tabla 8-3: Pacientes que acuden a los centros de rehabilitación de Riobamba

| Centro de rehabilitación | Equipo de rehabilitación de muñecas (Si / No) | Número de pacientes que acuden al centro para la rehabilitación por mes |
|--------------------------|---|---|
| Joly Kid's | No | 4 |
| Terapia Center | No | 5 |
| MIES | No | 3 |
| Privado | No | 4 |
| CENREFK | No | 4 |
| IESS RIOBAMBA | No | 5 |
| PAZMIÑO NARVAEZ | No | 3 |

Fuente: Encuesta realizada en centros de fisioterapia de la ciudad de Riobamba

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

3.2.3. Parámetros funcionales

El diseño del prototipo exoesqueleto debe de satisfacer los requerimientos funcionales, es decir, el equipo debe cumplir las funciones para la cual fue diseñada tomando en cuenta algunas limitaciones.

Entre los principales requerimientos funcionales se tiene lo siguiente:

- El prototipo exoesqueleto debe realizar la rehabilitación de la muñeca de manera automática y cumplir con los movimientos requeridos para la rehabilitación.
- El prototipo de exoesqueleto debe ajustarse a la antropometría de las personas de la ciudad de Riobamba.
- El prototipo de exoesqueleto debe funcionar tanto en trabajo en vacío o a plena carga de la misma forma.
- La máquina debe de funcionar tanto para lesiones de muñeca de la mano izquierda y derecha.
- La máquina debe de ser de fácil operación y programación para que el usuario pueda manipular de manera autónoma bajo la rehabilitación de un especialista.

3.2.3.1. Restricciones y limitaciones.

El diseño debe cumplir con las expectativas, condiciones y operatividad del equipo, por lo cual se consideran restricciones y limitaciones del equipo.

- Los ángulos de operación deben ser los establecidos en cada rutina de movimiento dependiendo el tipo de lesión
- La alimentación eléctrica del equipo de rehabilitación debe de ser de 110 V
- Para dimensionar el equipo se debe considerar que el mismo sea de fácil transporte, de fácil montaje y desmontaje.

3.2.3.2. Ambiente de trabajo.

El equipo debe estar sobre una mesa en donde el paciente tenga la facilidad de realizar la rehabilitación de una manera cómoda y eficiente.

3.2.4 Determinación de las especificaciones de la máquina

El prototipo debe cumplir con todos los requerimientos y especificaciones necesarias para el correcto funcionamiento en el proceso de rehabilitación de la muñeca.

3.2.5 Matriz QFD o desarrollo de la función de calidad

Es un método globalizador cuyo objetivo principal es asegurar que en la definición de un producto o servicio se han considerado las necesidades y requerimientos de los usuarios, a la vez que también constituye una herramienta para la planificación de la calidad durante el ciclo de vida. Consiste en un proceso estructurado que permite traducir los requerimientos y deseos de los usuarios en requerimientos técnicos de ingeniería en cada fase del diseño y de la fabricación. (Riba, 2002)

3.2.5.1 Voz del usuario.

De acuerdo a las necesidades del cliente realizado mediante una encuesta el prototipo debe presentar las siguientes características.

- El prototipo de exoesqueleto debe ajustarse a la antropometría de la muñeca del paciente.
- Funcionamiento con energía eléctrica de 110 V

- Fácil montaje del equipo en la muñeca izquierda o derecha del paciente
- El prototipo de exoesqueleto debe de ser de fácil transporte
- El prototipo de exoesqueleto debe de ser de fácil programación para las diferentes rutinas de rehabilitación
- El prototipo de rehabilitación debe de contar con un manual de Usuario
- El prototipo de exoesqueleto debe contener control de velocidades y ángulos de operación
- El prototipo de exoesqueleto debe tener apagado de emergencia
- El prototipo de exoesqueleto debe brindar la comodidad para la rehabilitación del usuario
- Bajo costo del equipo
- El prototipo de exoesqueleto debe de ser silencioso

3.2.5.2 *Voz del diseñador.*

Al finalizar el análisis del requerimiento del usuario se detalla con las siguientes características.

- Movimientos de rehabilitación
- Varias secuencias de Rehabilitación
- Suministro de energía 110 V
- Exactitud de movimiento
- Manufactura aditiva mediante impresión 3D
- Dimensionamiento
- Automatización
- Fácil Mantenimiento
- Programación
- Botón de Pare de emergencia
- Duración de la rutina de rehabilitación

3.2.5.3. *Resultados de la matriz QFD.*

En la tabla adjunta se muestra la matriz QFD, según procedimiento planteado por Carles Riba.

Tabla 9-3: Matriz QFD

QFD: Casa de la Calidad
 Proyecto: Prototipo exoesqueleto

| Relaciones | | Correlaciones | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|--|---|---|---|---|--|--|---|---|---|----|----|
| Fuerte | ● | Positivo | + | | | | | | | | | | | | | |
| Moderado | ○ | Negativo | - | | | | | | | | | | | | | |
| Débil | ▽ | No Correlación | | | | | | | | | | | | | | |
| Dirección de Mejora | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Maximizar | ▲ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Objetivo | ◇ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Minimizar | ▼ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Columna # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | | | | | |
| Dirección de Mejora | ▲ | ▲ | ▼ | ▲ | ◇ | ◇ | ◇ | ▼ | ▲ | ▼ | ▼ | | | | | |
| Requisitos del cliente (explícitos e implícitos) | Movimientos de rehabilitación | Varias secuencias de Rehabilitación | Suministro de energía 110 V | Exactitud de movimiento | Manufactura aditiva mediante impresión 3D | Dimensionamiento | Automatización | Fácil Mantenimiento | Programación | Botón de Pave de emergencia | Duración de la rutina de rehabilitación | | | | | |
| Requerimientos funcionales | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fila # | Gráfico de peso | Peso relativo | Importancia del cliente | Relación Máxima | Requisito | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | | 9% | 7 | 9 | El prototipo de exoesqueleto debe ajustarse a la antropometría de la muñeca del paciente | ▽ | ▽ | ▽ | ● | ● | ● | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ |
| 2 | | 8% | 6 | 9 | Funcionamiento con energía eléctrica de 110 V | ▽ | ▽ | ● | ▽ | ▽ | ▽ | ○ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ |
| 3 | | 9% | 7 | 3 | Fácil montaje del equipo en la muñeca izquierda o derecha del paciente | ○ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ |
| 4 | | 9% | 7 | 9 | El prototipo de exoesqueleto debe de ser de Fácil transporte | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ○ | ● | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ |
| 5 | | 9% | 7 | 9 | El prototipo de exoesqueleto debe de ser de fácil programación para las diferentes rutinas de rehabilitación | ● | ● | ▽ | ○ | ○ | ▽ | ● | ▽ | ● | ▽ | ○ |
| 6 | | 9% | 7 | 9 | El prototipo de rehabilitación debe de contar con un manual de Usuario | ● | ● | ○ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ○ | ● | ○ | ○ |
| 7 | | 9% | 7 | 9 | El prototipo de exoesqueleto debe contener control de velocidades y ángulos de operación | ● | ● | ▽ | ● | ▽ | ▽ | ● | ○ | ● | ▽ | ▽ |
| 8 | | 9% | 7 | 9 | El prototipo de exoesqueleto debe tener apagado de emergencia | ▽ | ▽ | ▽ | ○ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ● | ▽ |
| 9 | | 9% | 7 | 9 | El prototipo de exoesqueleto debe brindar la comodidad para la rehabilitación del usuario | ● | ● | ▽ | ▽ | ● | ○ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ |
| 10 | | 9% | 7 | 9 | Bajo costo del equipo | ▽ | ▽ | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ● | ○ | ▽ |
| 11 | | 9% | 7 | 3 | El prototipo de exoesqueleto debe de ser silencioso | ○ | ▽ | ▽ | ○ | ○ | ▽ | ○ | ▽ | ▽ | ▽ | ▽ |
| Objetivo | Objetivo para el Requisito Funcional #1 | Objetivo para el Requisito Funcional #2 | Objetivo para el Requisito Funcional #3 | Objetivo para el Requisito Funcional #4 | Objetivo para el Requisito Funcional #5 | Objetivo para el Requisito Funcional #6 | Objetivo para el Requisito Funcional #7 | Objetivo para el Requisito Funcional #8 | Objetivo para el Requisito Funcional #9 | Objetivo para el Requisito Funcional #10 | Objetivo para el Requisito Funcional #11 | | | | | |
| Relación máxima | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 3 | 9 | 9 | 3 | | | | | |
| Clasificación de importancia técnica | 431,58 | 394,74 | 200 | 376,32 | 321,05 | 284,21 | 355,26 | 155,26 | 394,74 | 210,53 | 136,84 | | | | | |
| Peso relativo | 13% | 12% | 6% | 12% | 10% | 9% | 11% | 5% | 12% | 6% | 4% | | | | | |
| Gráfico de peso | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Encuesta realizada en centros de fisioterapia de la ciudad de Riobamba

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

3.2.5.4. Conclusiones de la matriz QFD.

Mediante el desarrollo de la matriz se obtiene los requerimientos que satisfagan a las personas que tienen una lesión en la muñeca para mejorar su rehabilitación física, entre los cuales se tiene:

- Movimientos de rehabilitación: El prototipo exoesqueleto debe cumplir con todos los movimientos realizados por un terapeuta profesional.
- Varias secuencias de Rehabilitación: Mediante la programación el usuario puede seleccionar el tipo de movimiento que requiere el paciente para la rehabilitación.
- Exactitud de movimiento: Mediante motores de paso se controlará los grados de movimiento para cada una de las terapias que requiere el paciente.
- Programación: El prototipo exoesqueleto debe poseer un menú de control donde el usuario pueda seleccionar el tipo de mano, rehabilitación, grados de movimiento, tiempo de la sesión.
- Automatización. Los controles de las rutinas de rehabilitación deben de ser en su totalidad de manera automática.

3.2.6 Especificaciones técnicas.

Mediante la matriz QFD se permite obtener las especificaciones técnicas del equipo rehabilitador.

Tabla 10-3: Especificaciones técnicas del equipo rehabilitador

| Especificaciones | | | |
|--|---------|-----|--|
| Concepto | Propone | R/D | Descripción |
| Función | D | R | Cumplir con movimientos de rehabilitación de la muñeca |
| Diseño | C | R | Mecanismos |
| Materiales | C | R | Impresión 3D |
| Construcción y Montaje | D | R | Funcional para muñeca izquierda y derecha |
| Vida Útil y mantenimiento | D | D | El prototipo debe tener una buena confiabilidad |
| | D | R | Fácil Mantenimiento |
| Energía | C | R | Energía Eléctrica 110 V |
| Dimensiones | C | R | Antropometría humana local |
| Propone: M = Marketing, C = Cliente, D = Diseño, P = Producción, F = Fabricación. R/D: R = Requerimiento, D = Deseo, MR = Modificación de Requerimiento | | | |

Fuente: Encuesta realizada en centros de fisioterapia de la ciudad de Riobamba

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

3.2.7 Análisis funcional

El análisis funcional se refiere a innovar a productos ya existentes, con nuevas soluciones, mejorando el producto con altos estándares de calidad a un costo más bajo.

Mediante el análisis funcional el cliente identifica él porque adquiere el producto, así como establecer las funciones primarias para el correcto funcionamiento del equipo.

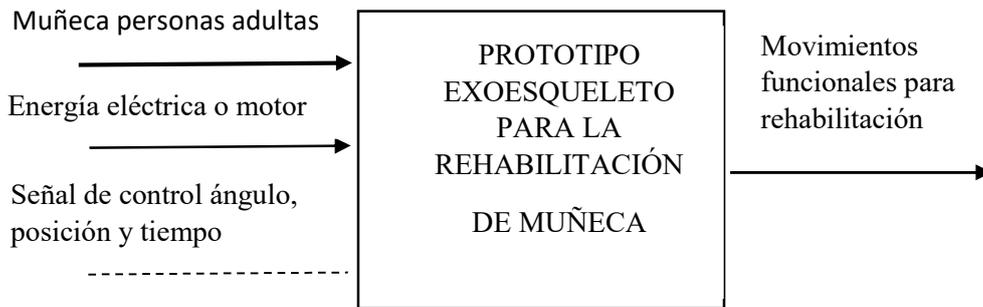


Figura 8-3. Diagrama función primaria del prototipo exoesqueleto

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En el análisis funcional se integra como primer nivel: Muñeca de personas adultas que corresponde al miembro superior al ser rehabilitado, fuente de energía que corresponde a la fuente de alimentación eléctrica y la señal de control que corresponde a la automatización del proceso.

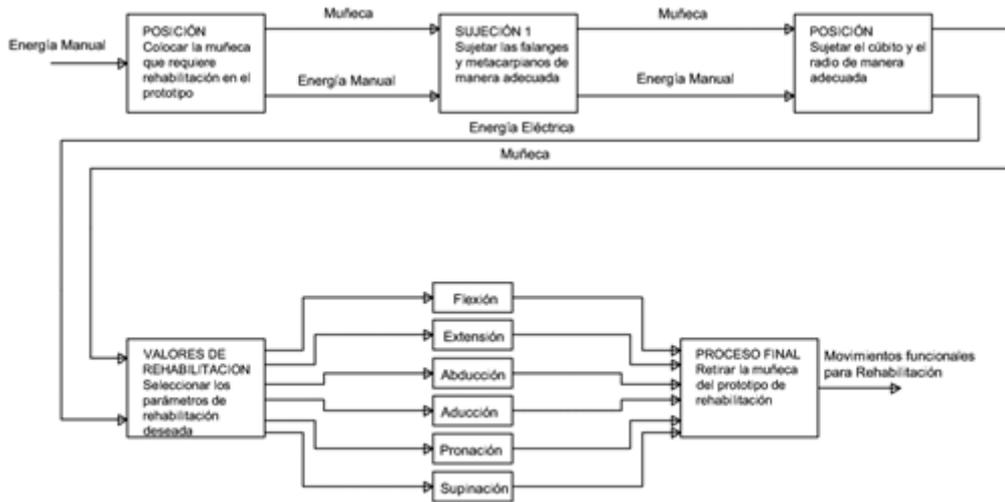


Figura 9-3. Diagrama de funciones secundarias del prototipo exoesqueleto

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

3.2.7.1 Definición de módulos.

Es la división del producto en varios bloques funcionales, lo cual ayuda a reducir costos y mantenimiento del equipo.

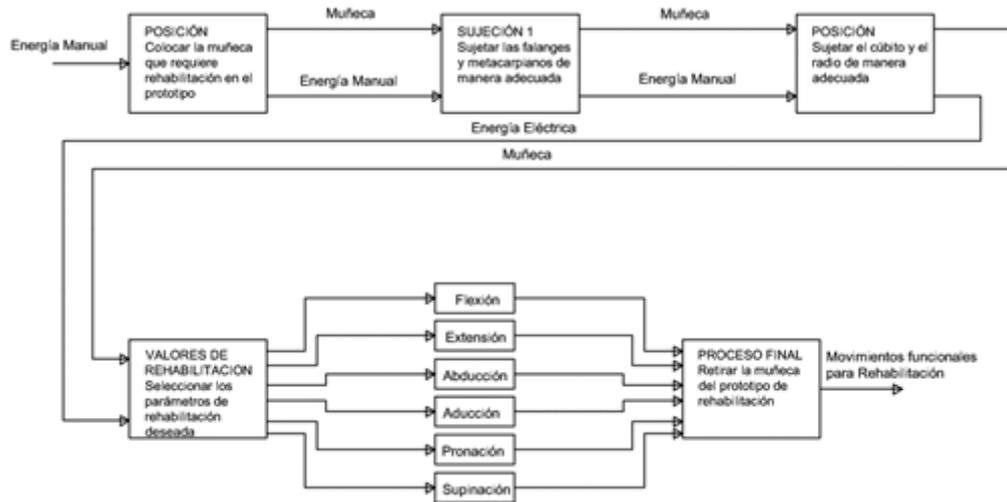


Figura 10-3. Estructura modular

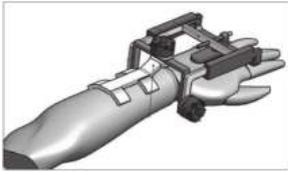
Fuente: Guerrero, Javier, 2023

3.2.8 Selección del mecanismo para el prototipo exoesqueleto

El principal objetivo del prototipo exoesqueleto es realizar los movimientos de rehabilitación, mediante el uso de tres servomotores los cuales servirán para simular los movimientos de flexión, extensión, pronación, supinación, aducción y abducción.

En cada función del módulo es necesario encontrar proponer varias alternativas para seleccionar la más adecuada.

Tabla 11-3: Selección más adecuada del prototipo rehabilitador

| CARACTERISTICA |  |  |  |
|--------------------------------------|---|--|---|
| Movimiento Flexión – Extensión | ✓ | ✓ | ✓ |
| Movimiento de Aducción – Abducción | ✓ | ✓ | ✓ |
| Movimiento de Pronación – Supinación | | | |
| Soporte Fijo | | ✓ | ✓ |
| Antropometría Humana | ✓ | ✓ | ✓ |
| Bajo error en movimiento | ✓ | ✓ | ✓ |
| Componentes Iguales | | ✓ | ✓ |
| Total | 4 | 6 | 6 |

Fuente: (Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación, 2020)

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

Un rehabilitador de muñeca seleccionado que permita realizar todos los movimientos requeridos para la rehabilitación y que cumpla con el requerimiento del especialista.

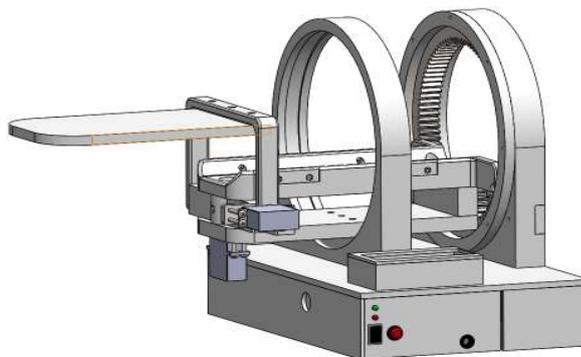


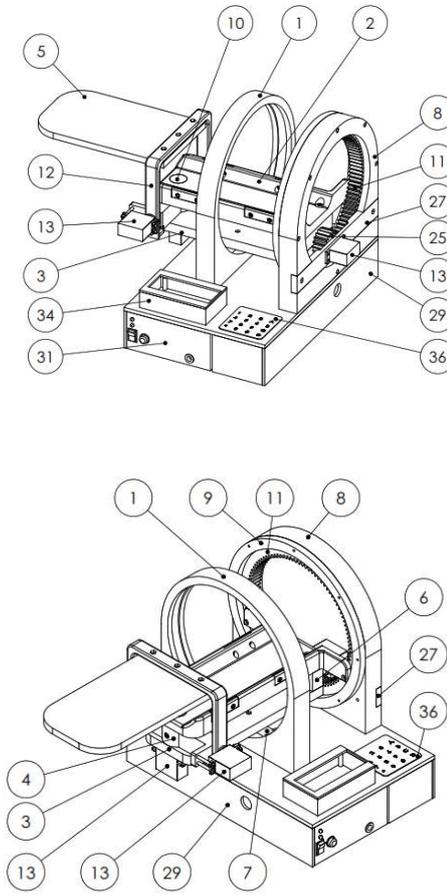
Figura 11-3. Prototipo automático exoesqueleto para rehabilitación de la muñeca

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

3.2.9. Características del prototipo rehabilitador de muñeca seleccionado

Evaluado las alternativas propuestas con sus diferentes criterios se selecciona la alternativa más adecuada, los requerimientos son traducidos a criterios técnicos lo cual ayuda a tener un diseño del equipo. Se seleccionó un prototipo que permita la rehabilitación de la muñeca, mediante funcionamiento en base a mecanismos y que cumplan con movimientos para realizar la rehabilitación.

Tabla 12-3: Alternativa adecuada del prototipo rehabilitador

| Esquema | Nombre |
|--|---|
|  | 1. Riel de movimiento |
| | 2. Placa soporte de antebrazo |
| | 3. Placa de Unión |
| | 4. Placa de Abducción – aducción |
| | 5. Placa soporte de mano |
| | 6. Soporte de Placas |
| | 7. Guía de movimiento |
| | 8. Soporte engranaje planetario |
| | 9. Guía de fijación de engranaje planetario |
| | 10. Eje de Motor movimiento de abducción – aducción |
| | 11. Engranaje Planetario |
| | 12. Soporte U |
| | 13. Servomotor |
| | 25. Piñón |
| | 27. Soporte motor posterior |
| | 29. Base |
| 31. Botonera | |
| 34. Pantalla LCD | |
| 36. Teclado | |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

3.2.10. Elementos del prototipo rehabilitador de muñeca.

A continuación, se detalla cada uno de los componentes.

- Panel de control. Permite el encendido, programación de rutinas, selección del brazo y apagado del equipo.
- Base sujeción mano. Mediante correas se fija la mano del paciente para la rehabilitación. Para lo cual se requiere que la mano permanezca lo más estática posible.
- Base sujeción antebrazo. Mediante correas se fija el antebrazo del paciente para la rehabilitación.
- Engranaje Planetario. Permite que realice el movimiento de Pronación – Supinación
- Motores Eléctricos. Los motores seleccionados serán los que permitan controlar los movimientos requeridos para la rehabilitación.
- Base. Elemento donde se montarán todos los componentes que conformen el prototipo de rehabilitación
- Guía Engranaje Planetario. Elemento se montará el engranaje y poder crear el movimiento de Pronación – Supinación

3.3 Diseño del sistema rehabilitador de muñecas

La rehabilitación de la muñeca en personas adultas de manera manual, se realiza mediante los diferentes tipos de movimientos que se realiza a la muñeca de manera progresiva que aplica el especialista a la persona en una o varias sesiones.

Para el pre diseño es importante tomar los requerimientos y necesidades del cliente, lo cual el ingeniero con criterios técnicos y normas traduce las ideas en la elaboración del prototipo, la consideración a tomar en cuenta en el diseño es la velocidad y ángulos de movimientos del prototipo.

Analizado el pre diseño del prototipo, se realiza el diseño definitivo teniendo en cuenta los requerimientos que el cliente necesita.

Las consideraciones para el diseño final son las siguientes:

- Estética del prototipo
- Fácil operación del prototipo
- Funcionamiento del prototipo

3.4 Diseño de elementos

Para el diseño del prototipo exoesqueleto se considera una persona de 200 lb de masa.

Para el diseño se va considerar un factor de seguridad de 2, por lo tanto, el peso de la persona se multiplicará por el factor de seguridad.

$M_{\text{mano}} = 0,703\%$ de la masa total del individuo

$M_{\text{mano}} = 1.40 \text{ kg}$

$P_{\text{mano}} = 13.79 \text{ N}$

$M_{\text{antebrazo}} = 1.818\%$ de la masa total del individuo

$M_{\text{antebrazo}} = 3.63 \text{ kg}$

$P_{\text{antebrazo}} = 35.67 \text{ N}$

Mediante el software Adams View se realiza la simulación para encontrar la potencia y la fuerza máxima requerida por los motores del prototipo.

Para el análisis en Adams View se va a realizar el análisis por cada uno de los movimientos que se realizan en la rehabilitación.

3.4.1 Diseño de elementos para el movimiento de Flexión-extensión

Con el uso del Software SolidWorks se modela los elementos que intervendrán en el movimiento de la rehabilitación, para exportar al software Adams View.

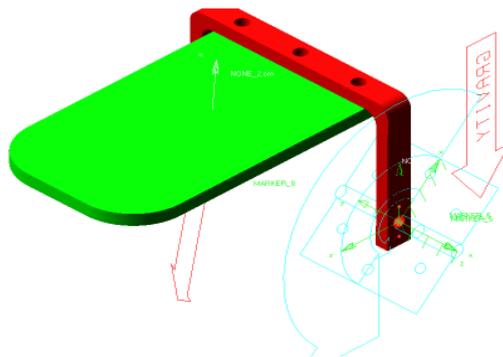


Figura 12-3. Unión de elementos y ubicación de fuerzas en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Para el material en todos los casos de movimiento de la rehabilitación en Adams Viewer se selecciona Fibra de vidrio plástico el cual tiene características de densidad similares a un material PLA.

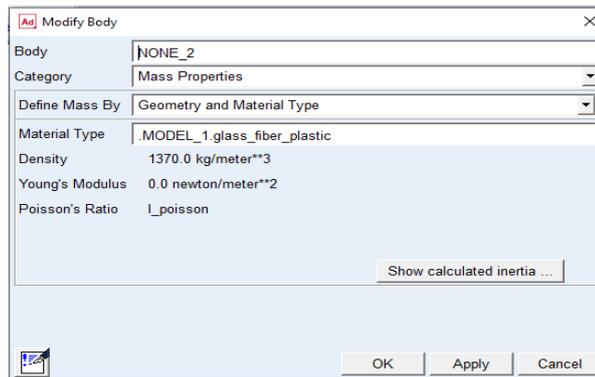


Figura 13-3. Asignación de material en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

El valor de la fuerza a la que está expuesto los elementos es el peso de la mano.

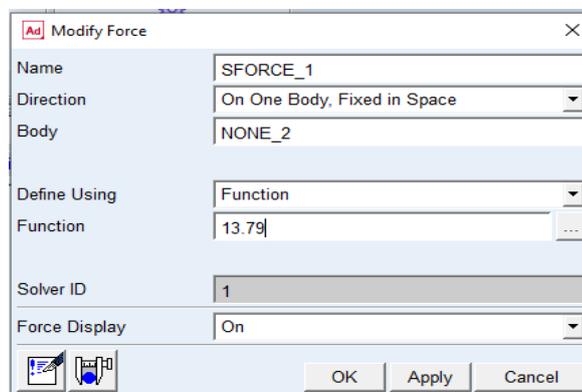


Figura 14-3. Asignación de peso de la mano en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Para la simulación de movimiento se hace referencia a los grados que requiere el paciente para la rehabilitación de manera manual.

Flexión: 0-50°/60° (AO) y 0-80° (AAOS).

Extensión: 0-35°/60° (AO) y 0-70° (AAOS).

Para el caso de la simulación se toma como referencia los valores máximos tanto de flexión como extensión (AO).

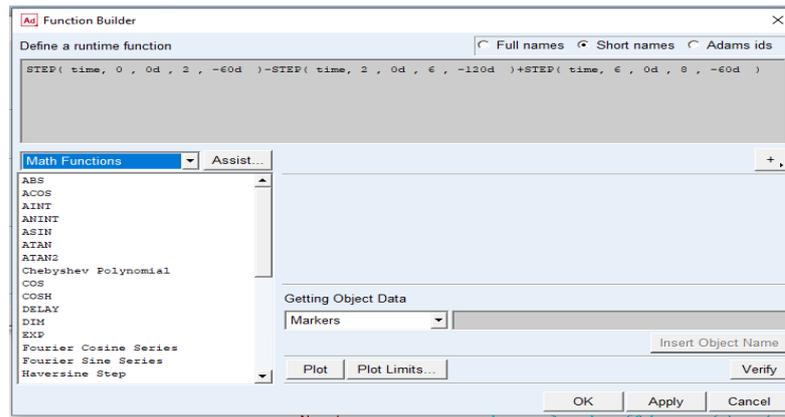


Figura 15-3. Asignación de grados máximos en Adams View para movimiento de flexión - extensión

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En los resultados se requiere conocer la potencia y la fuerza resultante necesaria para que el mecanismo cumpla con el movimiento requerido para la rehabilitación, mediante el software Adams Viewer se obtiene los datos.

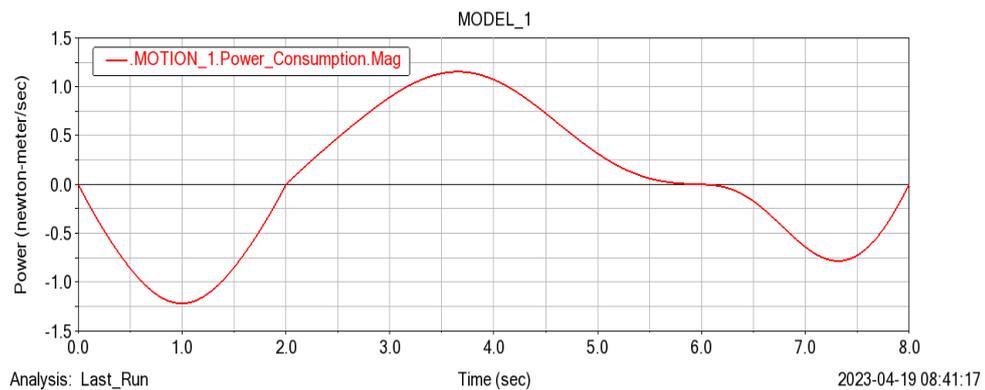


Figura 16-3. Potencia máxima requerida para flexión - extensión de rehabilitación en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Potencia máxima = 1.15 W

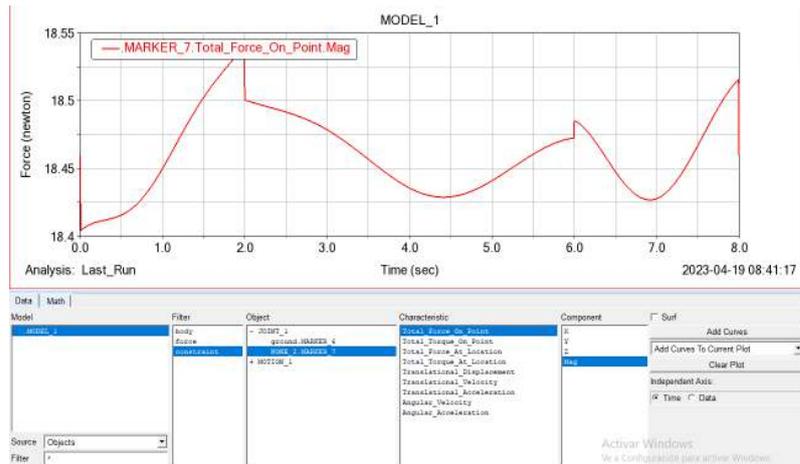


Figura 17-3. Fuerza resultante del eje para flexión - extensión de rehabilitación en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Fuerza resultante máxima en el eje del motor = 18.54 N

Mediante la gráfica se puede ver que, a los 2 segundos, 60° de movimiento es el punto donde el prototipo realiza mayor fuerza, el cual será un punto de análisis para determinar el espesor de cada elemento y su respectivo factor de seguridad.

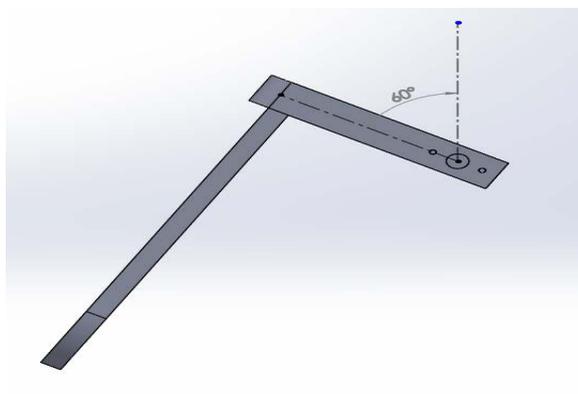


Figura 18-3. Análisis a 60° flexión - extensión

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

3.4.1.1. Diseño estático de elementos mediante simulación computacional

Mediante SpaceClaim se importa el sólido previamente modelado en SolidWorks, el cual servirá para crear superficies medias de todos los elementos que vamos a diseñar.

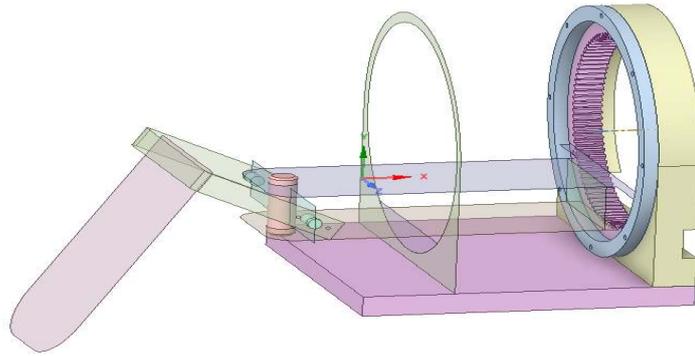


Figura 19-3. Superficie media de elementos a 60° SpaceClaim

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En Static Structural se procede a realizar el mallado de todos los elementos y colocar las fuerzas que actúan sobre el prototipo como peso de la mano, peso de antebrazo y peso de motores.

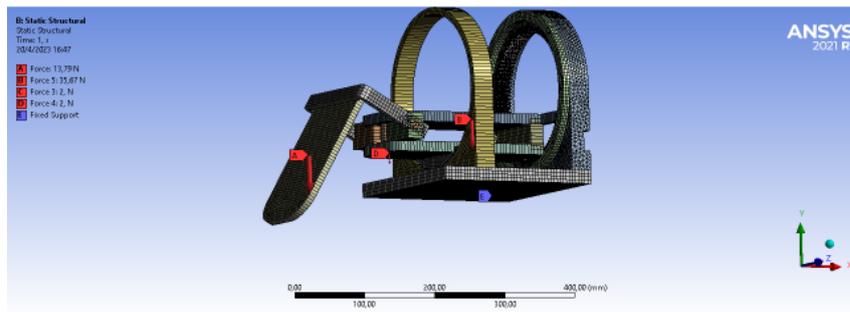


Figura 20-3. Mallado y fuerzas en prototipo a 60° Ansys

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Resolviendo en Static Structural se puede encontrar la deformación total cuando se aplican todas las fuerzas y el factor de seguridad en todo el prototipo.

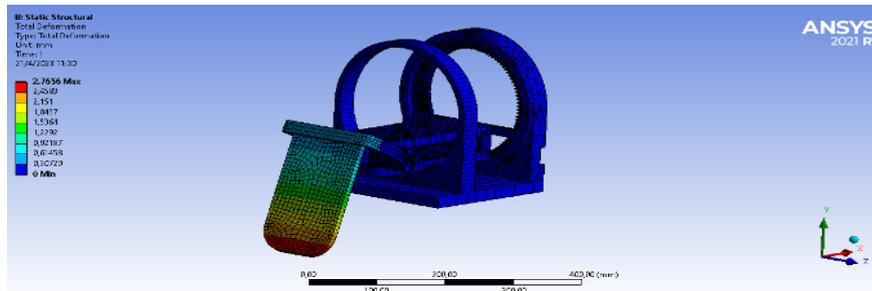


Figura 21-3. Deformación máxima en prototipo a 60° Ansys

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En la gráfica se puede observar que la deformación máxima es de 2.76 mm

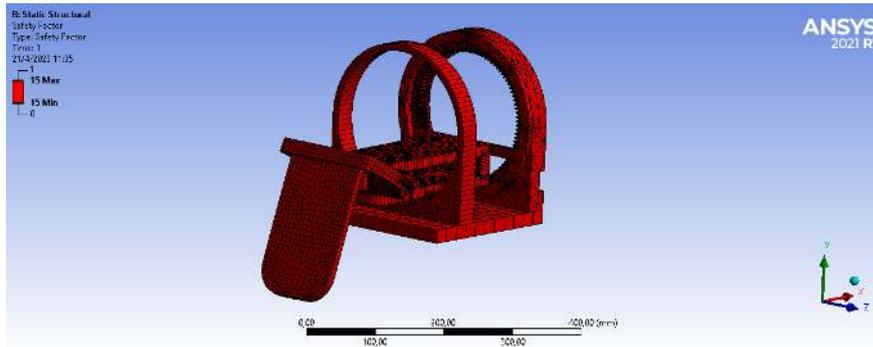


Figura 22-3. Factor de seguridad estático en prototipo a 60° Ansys

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Al calcular el factor de seguridad del prototipo se puede observar que está encima de 15, lo cual indica que está sobredimensionado cada uno de los elementos.

Mediante la parametrización se puede encontrar los diferentes factores de seguridad en relación a varios espesores para cada uno de los elementos.

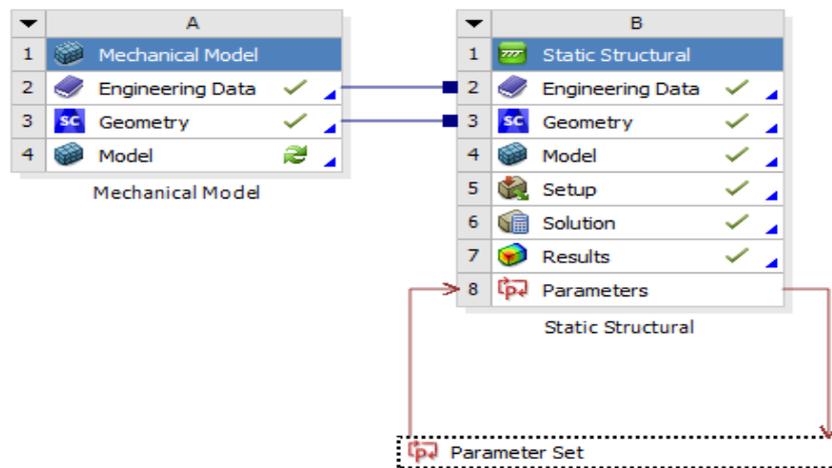


Figura 23-3. Parametrización en prototipo a 60°

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Los factores de seguridad en todos los elementos en relación de los espesores de las placas tienen un valor de 15.

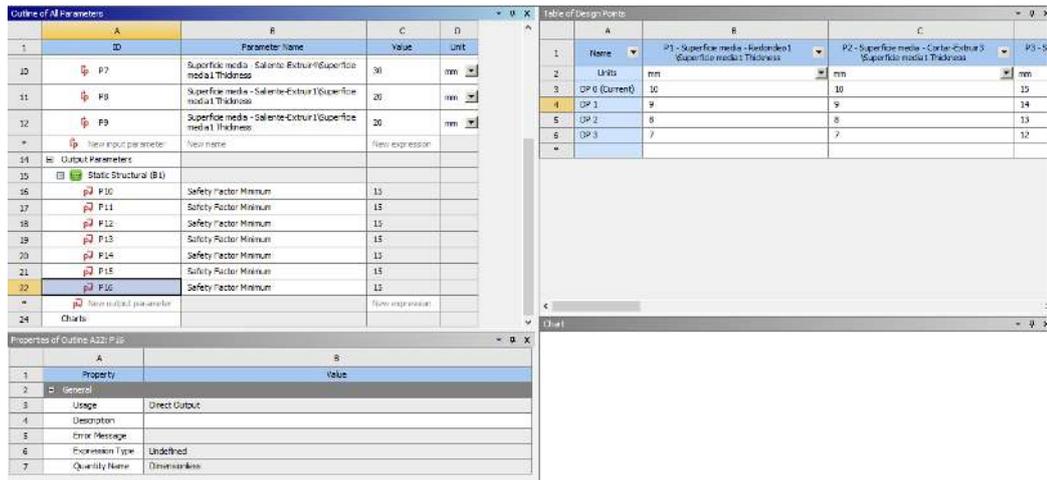


Figura 24-3. Resultados de parametrización en prototipo a 60°

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

3.4.1.2. Diseño dinámico de elementos mediante simulación computacional

Aplicando la teoría de Soderberg mediante Workbench Static Structural se procede a calcular el factor de seguridad para cargas dinámicas obteniendo un factor de seguridad $n = 5.1$ como se aprecia en la figura.

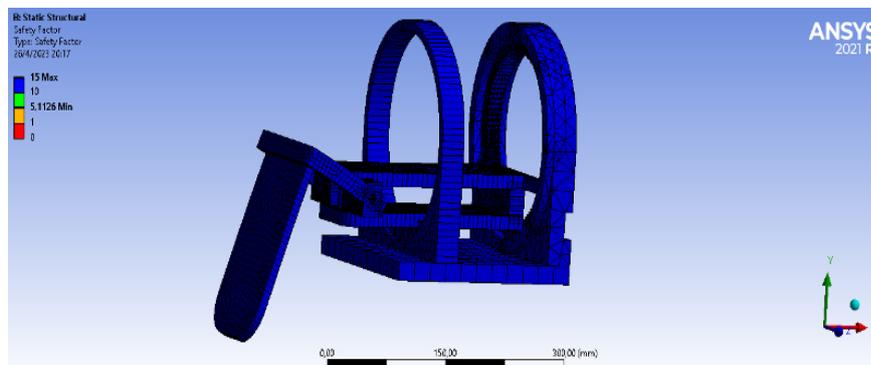


Figura 25-3. Diseño de prototipo caso dinámico a 60°

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Mediante el análisis de vida se tiene que los elementos están diseñados para una vida infinita

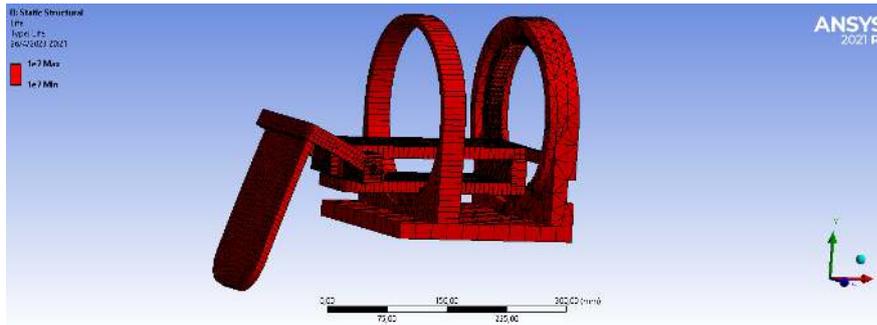


Figura 26-3. Factor de seguridad dinámico en prototipo a 60°

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

3.4.2. Diseño de elementos para el movimiento de abducción – aducción

Con el uso del Software SolidWorks se modela los elementos que intervendrán en el movimiento de la rehabilitación, para exportar al software Adams View.

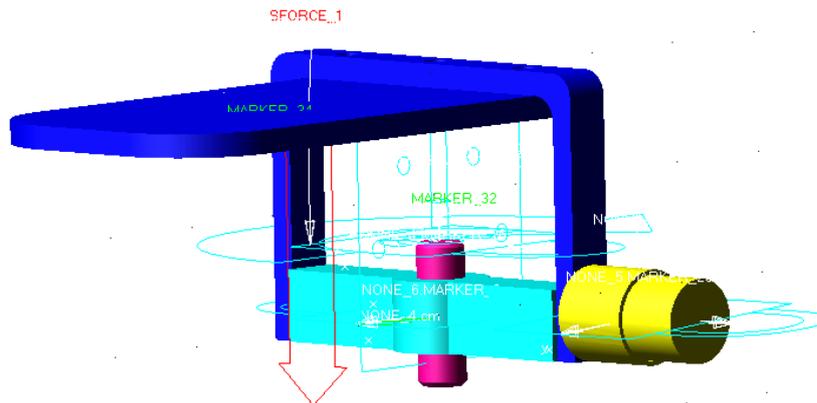


Figura 27-3. Uniones de elementos, fuerzas y motores en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

El valor de la fuerza a la que está expuesto los elementos es el peso de la mano y el peso del motor número 1.

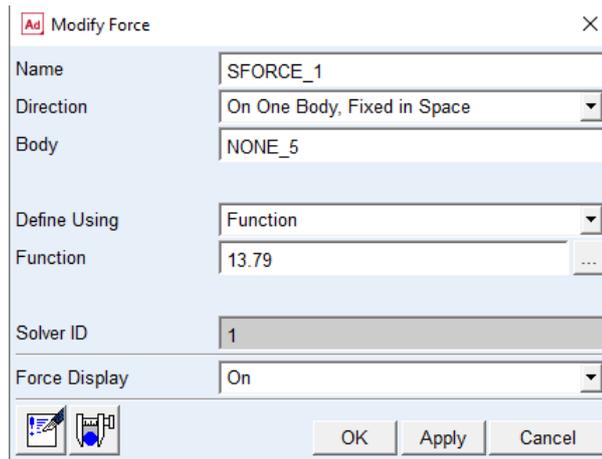


Figura 28-3. Asignación de peso de la mano en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Para la simulación de movimiento se hace referencia a los grados que requiere el paciente para la rehabilitación de manera manual.

Abducción: 0-25°/30° (AO), 0-20° (AAOS).

Aducción: 0-30/40° (AO), 0-30° (AAOS).

Para el caso de la simulación se toma como referencia los valores máximos tanto de Abducción como aducción (AO).

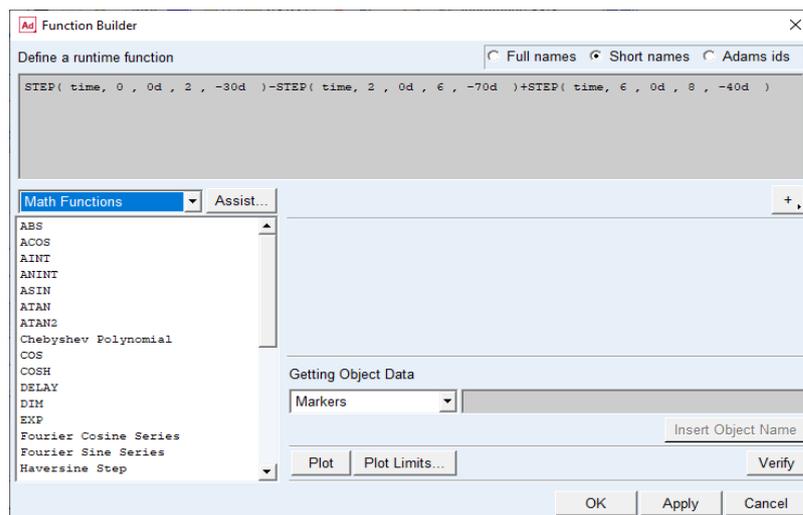


Figura 29-3. Asignación de grados máximos en Adams View para movimiento de aducción - abducción

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Mediante la gráfica se puede ver que, al inicio del movimiento y 0° es el punto donde el prototipo realiza mayor fuerza, el cual será un punto de análisis para determinar el espesor de cada elemento y su respectivo factor de seguridad.

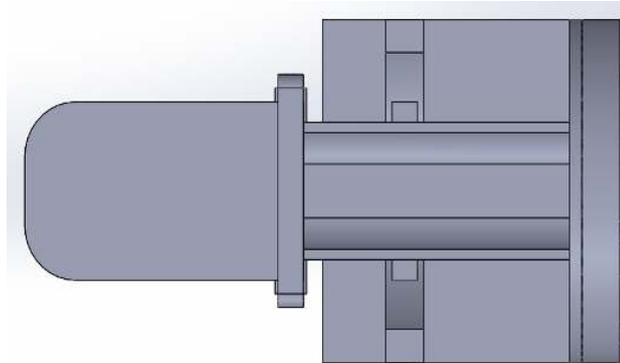


Figura 32-3. Análisis a 0° aducción - abducción

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

3.4.2.1. Diseño de elementos mediante software Ansys

Mediante SpaceClaim se importa el sólido previamente modelado en SolidWorks, el cual servirá para crear superficies medias de todos los elementos que vamos a diseñar.

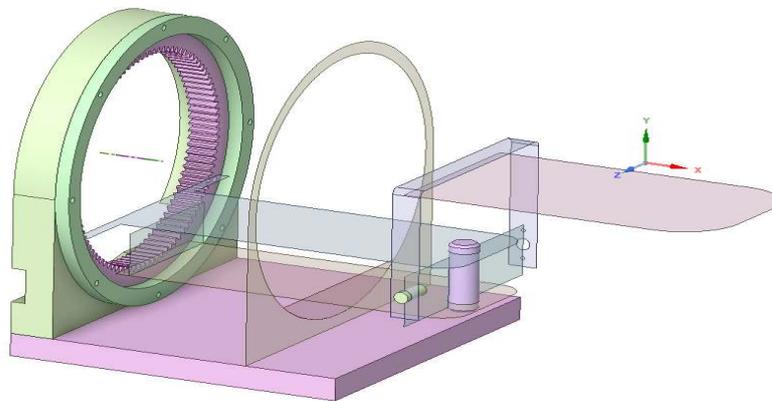


Figura 33-3. Superficie media de elementos a 0° SpaceClaim

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En Static Structural se procede a realizar el mallado de todos los elementos y colocar las fuerzas que actúan sobre el prototipo como peso de la mano, peso de antebrazo y peso de motores.

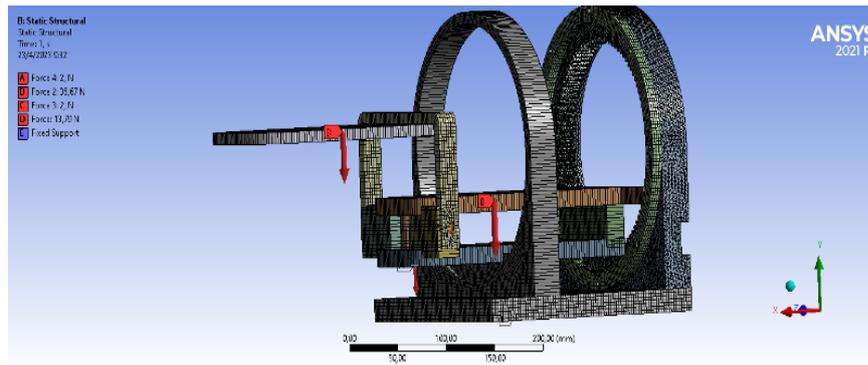


Figura 34-3. Mallado y fuerzas en prototipo a 0° Ansys

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Resolviendo en Static Structural se puede encontrar la deformación total cuando se aplican todas las fuerzas y el factor de seguridad en todo el prototipo.

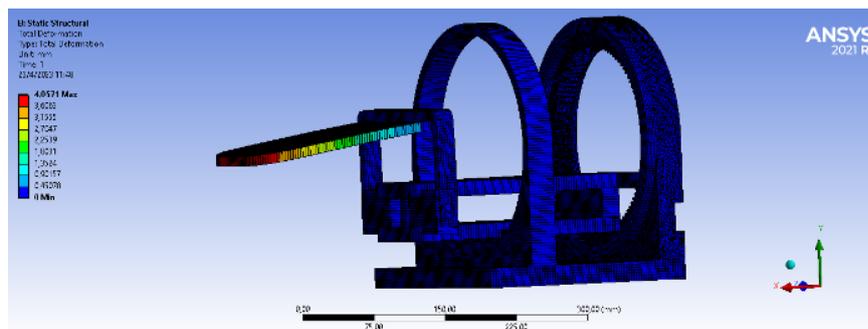


Figura 35-3. Deformación máxima en prototipo a 0° Ansys

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En la gráfica se puede observar que la deformación máxima es de 4.05 mm

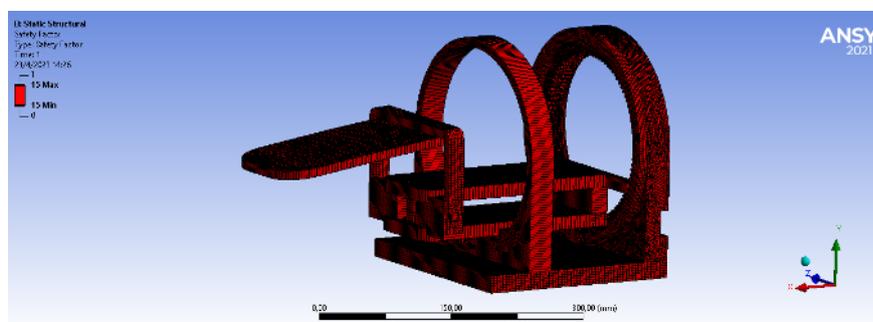


Figura 36-3. Factor de seguridad estático en prototipo a 0° Ansys

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Al calcular el factor de seguridad del prototipo se puede observar que está encima de 15, lo cual indica que está sobredimensionado cada uno de los elementos.

Mediante la parametrización se puede encontrar los diferentes factores de seguridad en relación a varios espesores para cada uno de los elementos.

Los factores de seguridad en todos los elementos en relación de los espesores de las placas tienen un valor de 15.

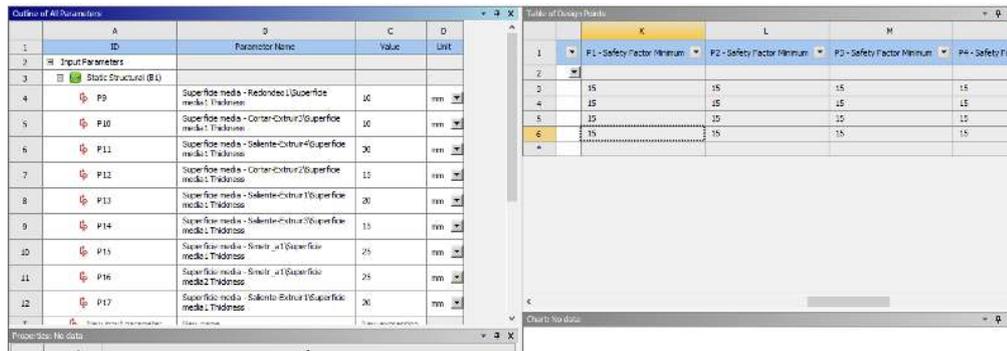


Figura 37-3. Resultados de parametrización en prototipo a 0°

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

3.4.2.2. Diseño dinámico de elementos mediante simulación computacional

Aplicando la teoría de Soderberg mediante Workbench Static Structural se procede a calcular el factor de seguridad para cargas dinámicas obteniendo un factor de seguridad $n = 11.2$ como se aprecia en la figura, por lo que se establece que el dimensionamiento es el adecuado.

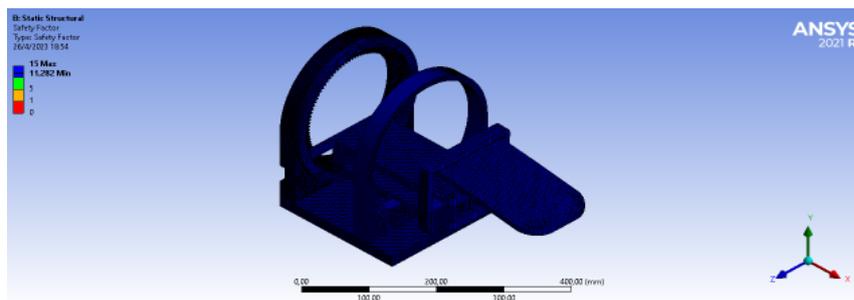


Figura 38-3. Diseño de prototipo caso dinámico a 0°

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Mediante el análisis de vida se tiene que los elementos están diseñados para una vida infinita

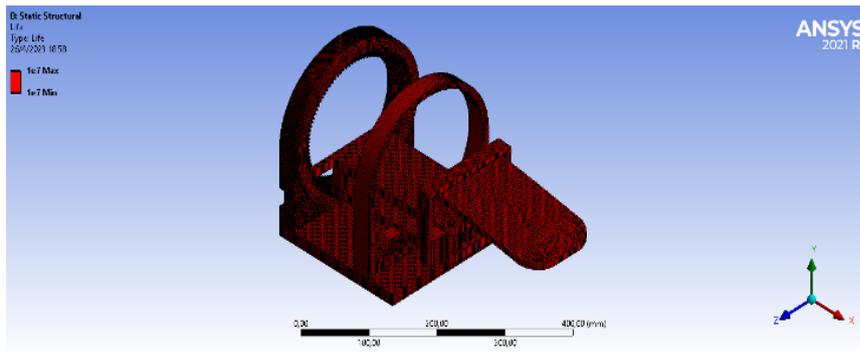


Figura 39-3. Factor de seguridad dinámico en prototipo a 0°

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

3.4.3. Diseño de elementos para el movimiento de pronación – supinación

Con el uso del Software SolidWorks se modela los elementos que intervendrán en el movimiento de la rehabilitación, para exportar al software Adams View.

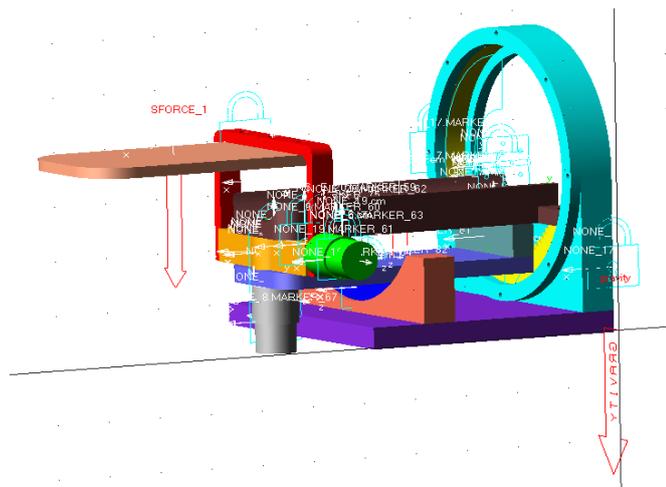


Figura 40-3. Uniones de elementos, fuerzas y motores en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Los valores de la fuerza a la que está expuesto los elementos es el peso de la mano, el peso del antebrazo y los motores.

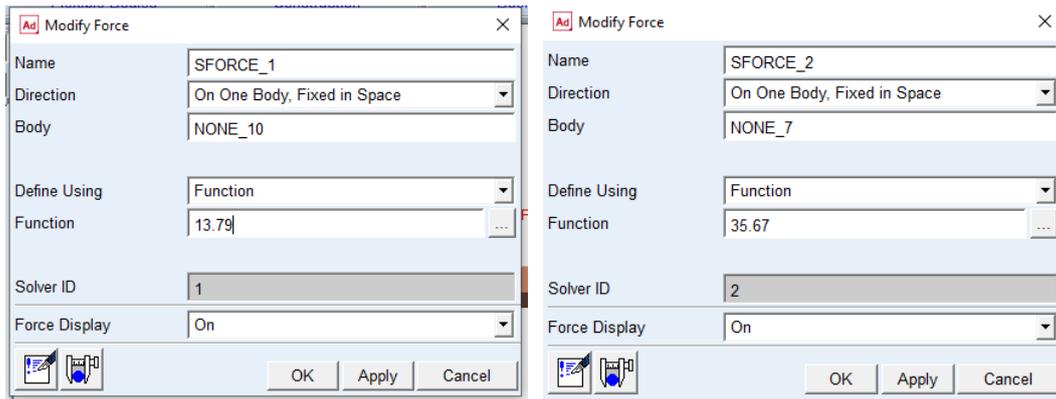


Figura 41-3. Asignación de peso de la mano y antebrazo en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Para la simulación de movimiento se hace referencia a los grados que requiere el paciente para la rehabilitación de manera manual.

Supinación: 0-60° (AO) y 0-80° (AAOS)

Pronación: 0-90° (AO) y 0-80° (AAOS)

Para el caso de la simulación se toma como referencia los valores máximos tanto de Supinación como Pronación (AO).

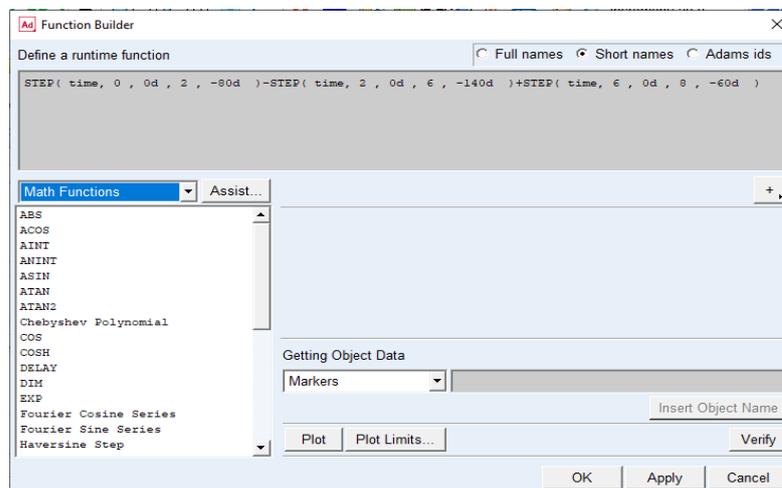


Figura 42-3. Asignación de grados máximos en Adams View para movimiento de pronación - supinación

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En los resultados se requiere conocer la potencia y la fuerza resultante necesaria para que el mecanismo cumpla con el movimiento requerido para la rehabilitación, mediante el software Adams View se obtiene los datos.

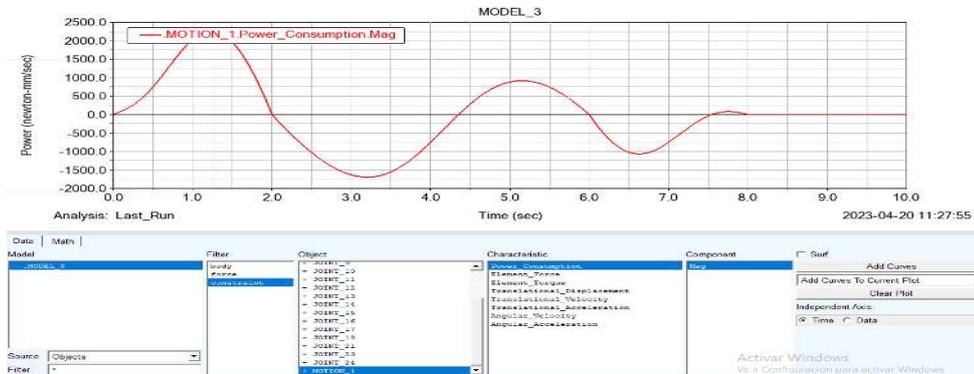


Figura 43-3. Potencia máxima requerida para pronación - supinación de rehabilitación en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Potencia máxima = 2268.79 W

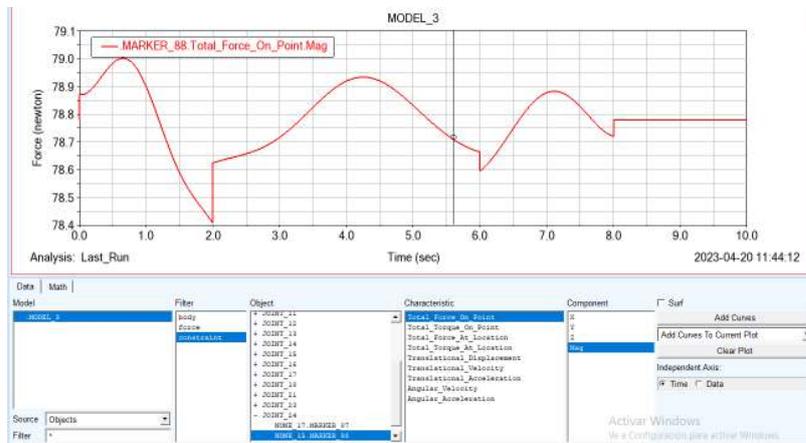


Figura 44-3. Fuerza resultante del eje para pronación - supinación de rehabilitación en Adams View

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Fuerza resultante máxima del eje = 79 N

Mediante la gráfica se puede ver que, al inicio del movimiento y 30° es el punto donde el prototipo realiza mayor fuerza, el cual será un punto de análisis para determinar el espesor de cada elemento y su respectivo factor de seguridad.

3.4.3.1 Diseño de elementos mediante software Ansys

Mediante SpaceClaim se importa el sólido previamente modelado en SolidWorks, el cual servirá para crear superficies medias de todos los elementos que vamos a diseñar.

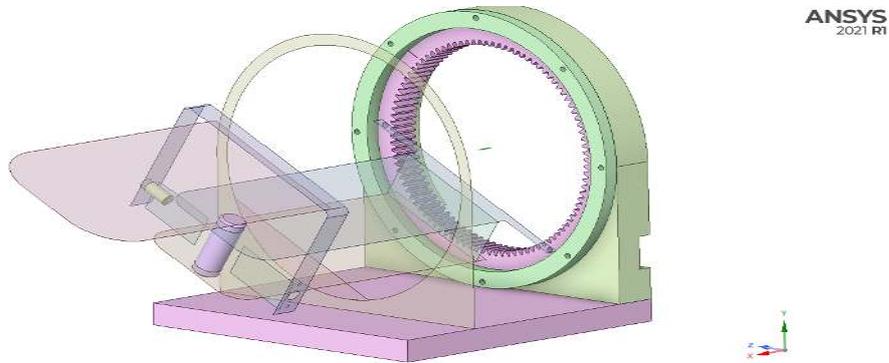


Figura 45-3. Superficie media de elementos a 30° SpaceClaim

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En Static Structural se procede a realizar el mallado de todos los elementos y colocar las fuerzas que actúan sobre el prototipo como peso de la mano, peso de antebrazo y peso de motores.

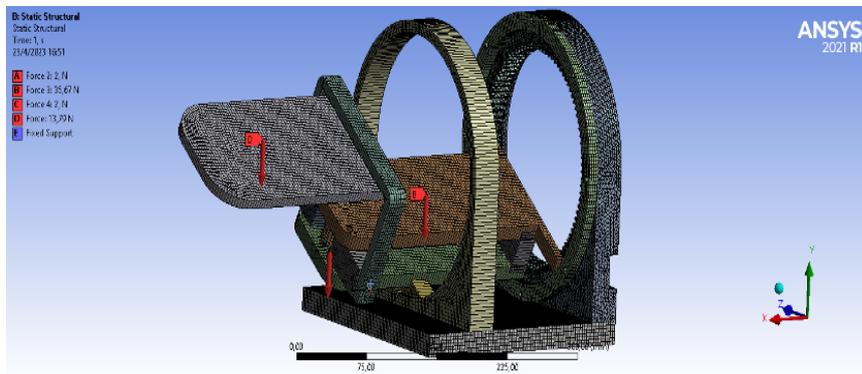


Figura 46-3. Mallado y fuerzas en prototipo a 30° Ansys

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Resolviendo en Static Structural se puede encontrar la deformación total cuando se aplican todas las fuerzas y el factor de seguridad en todo el prototipo.

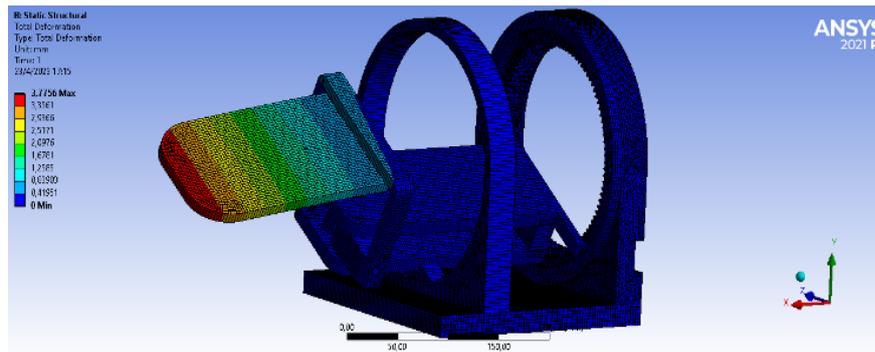


Figura 47-3. Deformación máxima en prototipo a 30° Ansys

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En la gráfica se puede observar que la deformación máxima es de 3.77 mm

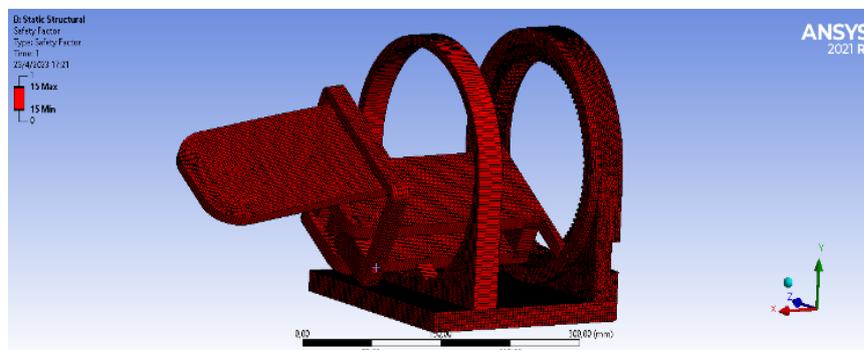


Figura 48-3. Factor de seguridad estático en prototipo a 30° Ansys

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Al calcular el factor de seguridad del prototipo se puede observar que está encima de 15, lo cual indica que está sobredimensionado cada uno de los elementos.

Mediante la parametrización se puede encontrar los diferentes factores de seguridad en relación a varios espesores para cada uno de los elementos.

Los factores de seguridad en todos los elementos en relación de los espesores de las placas tienen un valor de 15.

3.4.3.2 Diseño dinámico de elementos mediante simulación computacional

Aplicando la teoría de Soderberg mediante Workbench Static Structural se procede a calcular el factor de seguridad para cargas dinámicas obteniendo un factor de seguridad $n = 6$ como se aprecia en la figura.

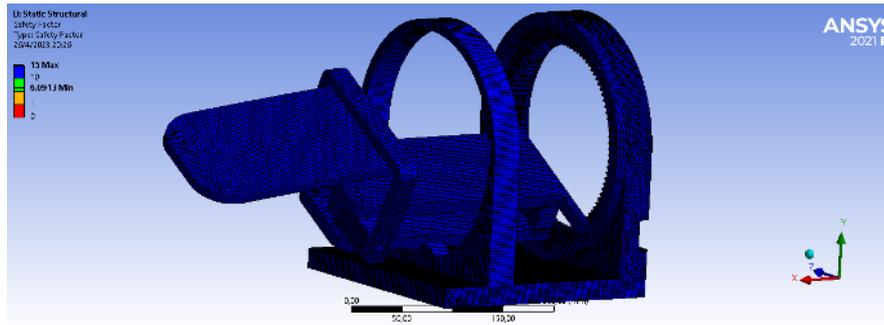


Figura 49-3. Diseño de prototipo caso dinámico a 30°

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Mediante el análisis de vida se tiene que los elementos están diseñados para una vida infinita

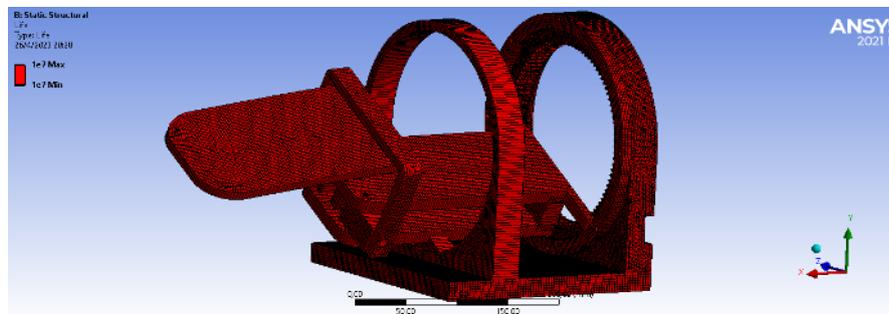


Figura 50-3. Factor de seguridad dinámico en prototipo a 30°

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Tabla 13-3: Comparación de factores de seguridad carga estática y dinámica

| Elemento | Movimiento Flexión – Extensión 60° | | Movimiento Abducción – Aducción 0° | | Movimiento Pronación – Supinación 30° | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|--|------------|---|------------|
| | n estático | n dinámico | n estático | n dinámico | n estático | n dinámico |
| Riel de movimiento | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Placa soporte de antebrazo | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Placa de Unión | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Placa de abducción aducción | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Placa soporte de mano | 15 | 15 | 15 | 13,3 | 15 | 12,9 |
| Soporte de Placas | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Guía de movimiento | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Soporte U | 15 | 15 | 15 | 11,2 | 15 | 10,4 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

3.5 Selección de servomotores

En base a las potencias y torques encontrados para cada uno de los diferentes tipos de movimientos que se requieren en la rehabilitación de la muñeca se selecciona un servomotor DS3220 PRO 30KG.

Tabla 14-3: Características de servomotor DS3220 PRO 30KG

| DS3220 PRO 30KG | Características |
|-----------------------|--------------------------------|
| Giro | 0 – 180 ° |
| Torque par de bloqueo | 39.5 kg/cm |
| Par de parada | 34.5 kg/cm |
| Velocidad | 0.2 seg / 60° |
| Señal de banda muerta | 3 us |
| Peso | 58 g +- 2 g |
| Tipo de Motor | Motor CC |
| Tipo de engranaje | Cobre y aluminio |
| Frecuencia de trabajo | 1520 us / 333 hz |
| Tamaño | 40 x 20 x 40.5 mm |
| Señal de comando | Modificación de ancho de pulso |

Fuente: Ficha técnica de servomotor DS3220 PRO 30KG

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

3.6 Diagrama electrónico

En la figura se puede observar el diagrama electrónico de los elementos utilizados para obtener los movimientos de rehabilitación del prototipo exoesqueleto de la muñeca.

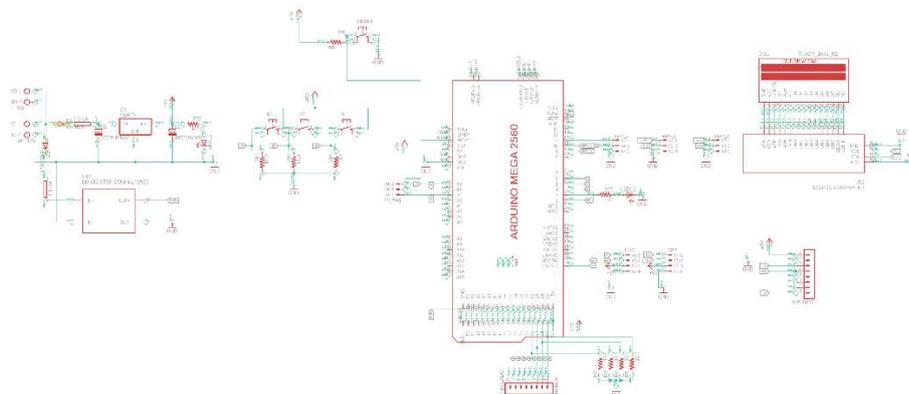


Figura 51-3. Diagrama electrónico

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se verificará los resultados obtenidos de movilidad y precisión del prototipo automático de exoesqueleto con movimiento mecánico para la rehabilitación de la muñeca en personas adultas.

4.1 Resultados

Durante las Pruebas de funcionamiento del prototipo se verificarán que los ángulos estén dentro del rango de movilidad para cada uno de los movimientos.



Figura 52-4. Prototipo exoesqueleto rehabilitador de muñeca

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

4.1.1 Plan de pruebas.

En el proceso de diseño y construcción se realizaron pruebas de todo el mecanismo en dos fases.

- Prueba de funcionalidad es la verificación que los elementos cumplan con los movimientos correctos y se obtengan los resultados deseados.
- Prueba resistencia es evaluar el comportamiento de cada componente del mecanismo en casos extremos.

4.1.1.1 Pruebas en vacío

Pruebas que se realizan para comprobar y verificar el funcionamiento del prototipo exoesqueleto sin aplicar cargas durante un periodo determinado sin presentar ningún inconveniente.

Con la prueba en vacío se calcula la potencia mínima que necesita el exoesqueleto para su funcionamiento en cada uno de los movimientos.



Figura 53-4. Voltaje e Intensidad de servomotores sin carga

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Tabla 15-4: Potencia de servomotores sin carga

| Tipo de prueba | Motor 1 | | Motor 2 | | Motor 3 | |
|--------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|
| | Intensidad de corriente (A) | Voltaje (V) | Intensidad de corriente (A) | Voltaje (V) | Intensidad de corriente (A) | Voltaje (V) |
| Arranque sin carga | 0.09 | 5 | 0.09 | 5 | 0.09 | 5 |
| Potencia | 0.45 | | 0.45 | | 0.45 | |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

Potencia en vacio

$$P = V * I$$

Donde:

P = Potencia (W)

V = Voltaje (V)

I = Corriente (A)

En la tabla se puede observar las pruebas realizadas al prototipo automático exoesqueleto sin carga, midiendo los diferentes ángulos máximos para cada una de los tipos de rehabilitación tanto para la mano derecha como la mano izquierda. Para medir el ángulo de cada movimiento se utilizará un goniómetro.

Tabla 16-4: Prueba de prototipo exoesqueleto sin carga

| PRUEBA SIN CARGA | | | | | | |
|------------------|------------------|--------------------------|---------|------------------|--------------------------|---------|
| Movimiento | Mano Izquierda | | | Mano Derecha | | |
| | Ángulo prototipo | Ángulo medido Goniómetro | % Error | Ángulo Prototipo | Ángulo medido Goniómetro | % Error |
| Flexión | 50 | 49.5 | 1 | 50 | 49.5 | 1 |
| Extensión | 35 | 34.5 | 1.43 | 35 | 34 | 1.43 |
| Aducción | 25 | 25 | 0 | 25 | 25 | 0 |
| Abducción | 30 | 29.5 | 1.66 | 30 | 29.5 | 1.66 |
| Pronación | 90 | 89 | 1.11 | 90 | 89 | 1.11 |
| Supinación | 60 | 59 | 1.66 | 60 | 59.5 | 0.83 |
| | Promedio | | 1.14 | Promedio | | 1 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

En la tabla se puede observar que las pruebas del equipo sin cargas son satisfactorias ya que cumplen con los movimientos requeridos obteniendo un porcentaje de error promedio de 1.14% para la mano izquierda y 1% para la mano derecha.

4.1.1.2 Pruebas en vacío

Pruebas que se realizan para comprobar y verificar el funcionamiento del prototipo exoesqueleto aplicando cargas durante un periodo determinado sin presentar ningún inconveniente.

En la tabla se puede observar las pruebas realizadas al prototipo automático exoesqueleto con carga, midiendo los diferentes ángulos para cada una de los tipos de rehabilitación tanto para la mano derecha como la mano izquierda. Para medir el ángulo de cada movimiento se utilizará un goniómetro.

Tabla 17-4: Prueba de prototipo exoesqueleto con carga

| PRUEBA CON CARGA | | | | | | |
|------------------|------------------|--------------------------|---------|------------------|--------------------------|---------|
| Movimiento | Mano Izquierda | | | Mano Derecha | | |
| | Ángulo prototipo | Ángulo medido Goniómetro | % Error | Ángulo Prototipo | Ángulo medido Goniómetro | % Error |
| Flexión | 50 | 49 | 2 | 50 | 48.5 | 3 |
| Extensión | 35 | 35 | 0 | 35 | 35 | 0 |
| Aducción | 25 | 24 | 4 | 25 | 24.5 | 2 |
| Abducción | 30 | 29.5 | 1.6 | 30 | 29 | 3.3 |
| Pronación | 90 | 89 | 1.1 | 90 | 89 | 1.1 |
| Supinación | 60 | 59 | 1.6 | 60 | 58.5 | 2.5 |
| | Promedio | | 1.71 | Promedio | | 1.9 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

En la tabla se puede observar que las pruebas del equipo sin cargas son satisfactorias ya que cumplen con los movimientos requeridos obteniendo un porcentaje de error promedio de 1.71% para la mano izquierda y 1.9% para la mano derecha.

4.1.2 Pruebas mecánicas del prototipo exoesqueleto

La parte fundamental para validar el equipo es verificar la ausencia de ruido, vibraciones. Por lo que se requiere pruebas con cargas por varios periodos lo cual ayuda a solventar imprevistos del equipo.

Los parámetros que se consideran para un correcto funcionamiento es el ángulo en el movimiento que realiza, la velocidad y la precisión que posee el equipo.

4.1.2.1 Verificación del movimiento del prototipo exoesqueleto

Como parte inicial se verifico el funcionamiento del equipo sin ninguna carga, teniendo un movimiento correcto sin presentar novedad alguna.

Posterior se realizó pruebas con una persona adulta con el fin de comprobar la correcta selección de los motores. El prototipo exoesqueleto debe de cumplir con los tres tipos de movimientos de rehabilitación a sus determinados ángulos.

El prototipo trabajando a plena carga no existe disminución de potencia en los motores, por lo tanto, cumple con los movimientos de rehabilitación requerida.

El ruido que presenta durante su funcionamiento es poco por lo que no incomoda al paciente.

En la tabla se muestra los resultados con sus respectivas observaciones.

Tabla 18-4: Resultados mecánicos de prototipo exoesqueleto

| Elemento | Ruidos | Vibración | Ningún Problema | Observaciones |
|---------------|--------|-----------|-----------------|---------------|
| Máquina | | | X | |
| Servo motores | | | X | |
| Planetarios | | | X | |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

4.1.3 Verificación de los requerimientos

El diseño más adecuado en la fabricación del prototipo exoesqueleto tiene mucha importancia la voz del usuario, el cual solicita determinadas características especiales que debe tener el equipo de acuerdo a la necesidad del cliente, mientras que el ingeniero interpreta y crea el diseño más adecuado de la máquina.

Una vez construido el prototipo exoesqueleto, realizado sus diferentes pruebas de funcionamiento, es necesario saber si cumple con la voz del usuario y del ingeniero.

4.1.3.1 Verificación de los requerimientos del usuario

La voz del usuario planteo las características y requerimientos del equipo los cuales, interpretados y llevados a criterios ingenieriles, La verificación se muestra en la tabla.

Tabla 19-4: Verificación de los requerimientos del usuario

| Requerimiento del usuario | Cumple | No cumple |
|--|---------------|------------------|
| El prototipo de exoesqueleto debe ajustarse a la antropometría de la muñeca del paciente | Si | |
| Funcionamiento con energía eléctrica de 110 V | Si | |
| Fácil montaje del equipo en la muñeca izquierda o derecha del paciente | Si | |
| El prototipo de exoesqueleto debe de ser de fácil transporte | Si | |
| El prototipo de exoesqueleto debe de ser de fácil programación para las diferentes rutinas de rehabilitación | Si | |
| El prototipo de rehabilitación debe de contar con un manual de Usuario | Si | |
| El prototipo de exoesqueleto debe contener control de velocidades y ángulos de operación | Si | |
| El prototipo de exoesqueleto debe tener apagado de emergencia | Si | |
| El prototipo de exoesqueleto debe brindar la comodidad para la rehabilitación del usuario | Si | |
| Bajo costo del equipo | Si | |
| El prototipo de exoesqueleto debe de ser silencioso | Si | |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

4.1.3.2 Verificación del criterio del ingeniero

Tabla 20-4: Verificación del criterio del ingeniero

| Voz del ingeniero | Cumple | No cumple |
|---|---------------|------------------|
| Movimientos de rehabilitación | Si | |
| Varias secuencias de Rehabilitación | Si | |
| Suministro de energía 110 V | Si | |
| Exactitud de movimiento | SI | |
| Manufactura aditiva mediante impresión 3D | SI | |
| Dimensionamiento | Si | |
| Automatización | Si | |
| Fácil Mantenimiento | Si | |
| Programación | Si | |
| Botón de Pare de emergencia | Si | |
| Duración de la rutina de rehabilitación | SI | |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

4.2 Discusión

Analizaremos la parte final del proyecto con el propósito de valorar de manera justificada el aporte del proyecto a la investigación.

El prototipo automático exoesqueleto para la rehabilitación de la muñeca permitió cumplir con los movimientos de flexión, extensión, pronación, supinación, aducción y abducción, además los movimientos cumplen con el valor máximo de los grados de rehabilitación.

En cuanto a la utilidad del prototipo se realizó pruebas para determinar la funcionalidad de la misma, la cual fue satisfactoria ya que el especialista en fisioterapia manifestó que el prototipo es capaz de simular los movimientos de la rehabilitación de la muñeca.

Los componentes del equipo hacen que el paciente este cómodo y pueda tener una adecuada rehabilitación de la muñeca. Dispone de un parado de emergencia que permite parar la sesión de rehabilitación en caso de algún inconveniente. Dispone de correas para una adecuada sujeción de la mano y muñeca, cuenta con una pantalla led donde el especialista puede seleccionar la mano, el tipo de rehabilitación, los grados de giro, el número de repeticiones y el tiempo de cada sesión que el paciente requiere.

En la parte de anexo se contará con un manual de funcionamiento del prototipo automático exoesqueleto para la rehabilitación de la muñeca.

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1 Introducción

En este capítulo se realiza un análisis sobre los procesos, materiales y costos para la construcción del prototipo rehabilitador de la muñeca y determinar la necesidad de la implementación de este tipo de equipos en varios centros de rehabilitación a nivel local, permitiendo tecnificar la rehabilitación.

5.2 Dimensiones

Las dimensiones del prototipo están enfocadas en la antropometría y comodidad del paciente, desde la parte mecánica, así como la estructura del prototipo.

A continuación, se muestra en la figura las dimensiones generales del prototipo.

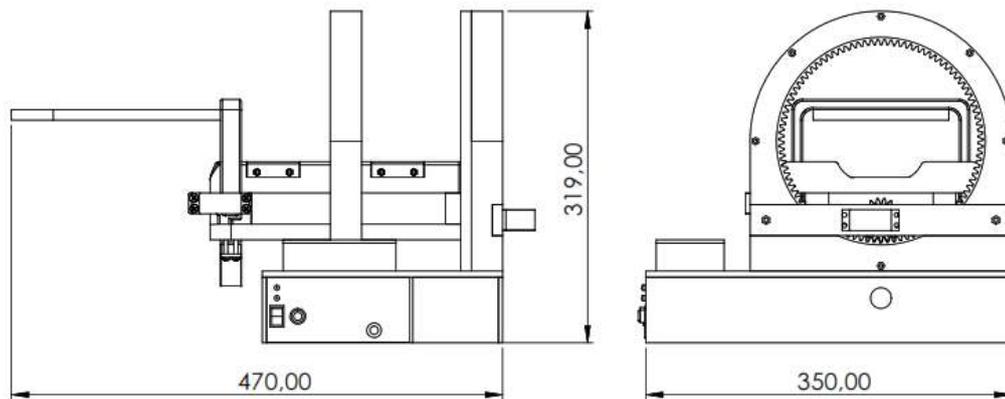


Figura 54-5. Dimensiones prototipo exoesqueleto rehabilitador de muñeca

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

5.3 Construcción y montaje

5.3.1. Generalidades

La construcción del prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva para simular movimientos mecánicos en la rehabilitación de las muñecas en personas adultas puede ser construida en un taller, que cuente con las herramientas necesarias para su construcción.

La construcción del prototipo se realizó en base al diseño anteriormente desarrollado con las medidas y funcionalidad especificada.

5.3.2. Construcción

La elaboración y montaje de los elementos que está constituida el prototipo exoesqueleto de rehabilitación requiere de las siguientes máquinas, equipos y herramientas.

- Impresora 3D
- Calibrador pie de Rey
- Flexómetro
- Nivel
- Escuadra
- Llaves
- Desarmadores

5.3.2.1 Componentes de la máquina

El proceso de construcción se realiza por etapas para optimizar tiempos.

El prototipo exoesqueleto se conforma de 3 etapas como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 21-5: Materiales que conforma la construcción del prototipo exoesqueleto

| Componentes | Material |
|-------------------------|--------------------------------|
| Elementos del prototipo | PLA - ABS |
| Sistema eléctrico | Placa – componentes eléctricos |
| Programación | Arduino |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

5.3.3 Procedimiento de la construcción

5.3.3.1 Elementos de la construcción

En la tabla se detalla cada elemento con su respectivo material que conforma el rehabilitador exoesqueleto.

Tabla 22-5: Elementos que conforma la construcción del prototipo exoesqueleto

| Nombre | Cantidad | Material / modelo |
|---|-----------------|--------------------------|
| 1. Base | 1 | Acrilico |
| 2. Riel de movimiento | 1 | PLA |
| 3. Placa soporte de antebrazo | 1 | PLA |
| 4. Placa de Unión | 1 | PLA |
| 5. Placa de Abducción – aducción | 1 | PLA |
| 6. Placa soporte de mano | 1 | PLA |
| 7. Soporte de Placas | 1 | PLA |
| 8. Guía de movimiento | 1 | PLA + INOX |
| 9. Soporte engranaje planetario | 1 | PLA |
| 10. Guía de fijación de engranaje planetario | 1 | PLA |
| 11. Eje de Motor movimiento de abducción – aducción | 1 | PLA |
| 12. Pin eje de Motor | 1 | PLA |
| 13. Soporte motor | 1 | PLA |
| 14. Engranaje Planetario | 1 | ABS |
| 15. Soporte U | 1 | PLA |
| 16. Motor eléctrico | 3 | |
| 17. Panel de Control | 1 | ARDUINO |
| 18. Soporte motor posterior | 1 | PLA |
| 19. Engrane motriz | 1 | ABS |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

5.3.3.2 *Tiempos de construcción prototipo exoesqueleto.*

Tabla 23-5: Tiempos de construcción del prototipo exoesqueleto

| Elemento | Nº | Operaciones | Tiempo (min) |
|--|-----------|-------------------------------------|---------------------|
| Base | 1 | Corte de Acrílico | 60 |
| | 2 | Unión de Piezas | 30 |
| | 3 | Armado | 15 |
| Riel de movimiento | 4 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 5 | Colocar material en impresora | 5 |
| | 6 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 7 | Impresión | 1469 |
| Placa soporte de antebrazo | 8 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 9 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 10 | Impresión | 1433 |
| Placa de unión | 11 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 12 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 13 | Impresión | 798 |
| Placa de abducción – aducción | 14 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 15 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 16 | Impresión | 484 |
| Placa soporte de mano | 17 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 18 | Colocar material en impresora | 5 |
| | 19 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 20 | Impresión | 1705 |
| Soporte de placas | 21 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 22 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 23 | Impresión | 248 |
| Guía de movimiento | 24 | | 120 |
| Soporte engranaje planetario | 25 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 26 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 27 | Impresión | 1547 |
| | 28 | Lijado | 10 |
| Guía de fijación de engranaje planetario | 29 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 30 | Colocar material en impresora | 5 |
| | 31 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 32 | Impresión | 421 |

| | | | |
|---|----|-------------------------------------|-------|
| Eje de motor movimiento de abducción – aducción | 33 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 34 | Colocar material en impresora | 5 |
| | 25 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 36 | Impresión | 110 |
| Pin eje de motor | 37 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 38 | Colocar material en impresora | 5 |
| | 39 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 40 | Impresión | 33 |
| Engranaje planetario | 41 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 42 | Colocar material en impresora | 5 |
| | 43 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 44 | Impresión | 926 |
| Soporte U | 45 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 46 | Colocar material en impresora | 5 |
| | 47 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 48 | Impresión | 335 |
| Soporte motor posterior | 49 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 50 | Colocar material en impresora | 5 |
| | 51 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 52 | Impresión | 214 |
| Engrane motriz | 53 | Calibración de Cama Impresora | 5 |
| | 54 | Colocar material en impresora | 5 |
| | 55 | Precalentamiento de boquilla y cama | 5 |
| | 56 | Impresión | 130 |
| Tiempo total (min) | | | 10273 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

El tiempo total para construir y realizar el montaje del equipo es de 171.2 horas, dando un total de 21,4 días de trabajo en jornadas de 8 horas diarias.

5.3.3.3 Flujograma de construcción

Permite conocer el orden en la fase de construcción de cada elemento

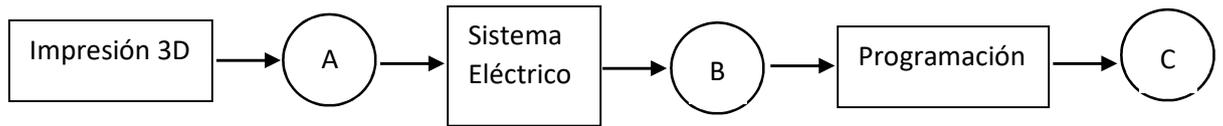


Figura 55-5. Flujograma de construcción general

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

5.3.4 Manufactura de los componentes del prototipo

Una vez adquiridos los servomotores y diseñados todos los elementos en Solidworks se procedió a la impresión en 3D de cada uno de los componentes del prototipo exoesqueleto para lo cual se usa un software que permita configurar los parámetros de impresión como:

- Altura de capa
- Temperatura de nozzle
- Temperatura de cama
- Tipo de material
- Soportes
- Flujo de material
- Relleno

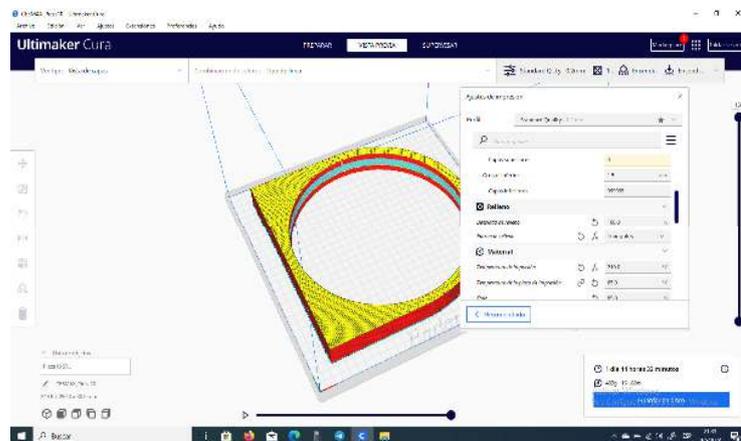


Figura 56-5. Configuración de parámetros impresión 3D

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Para la impresión en 3D se debe considerar los parámetros de impresión de cada material.

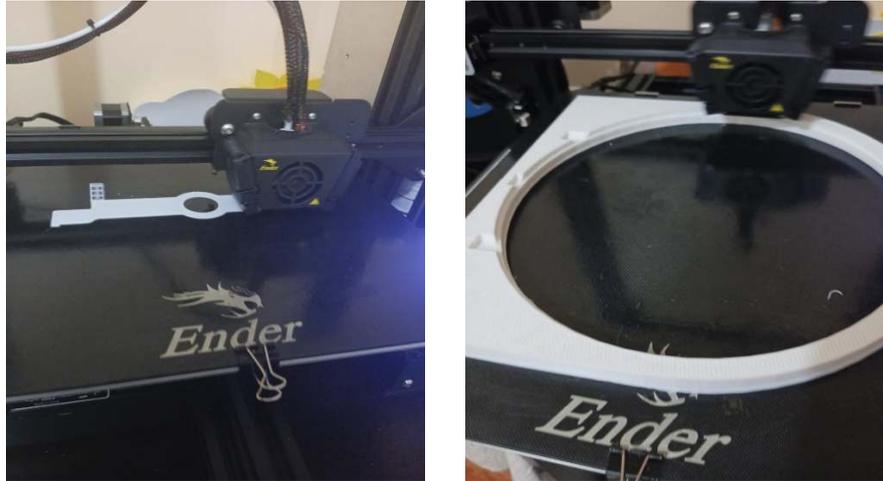


Figura 57-5. Impresión 3D de elementos del prototipo

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

5.3.5 Implementación del sistema de control

Para el prototipo exosqueleto se realizó mediante una tarjeta de Arduino con todos los elementos necesarios para controlar los servomotores dependiendo el tipo de rehabilitación que se realiza al paciente.

Se realizó una placa para realizar las conexiones del sistema eléctrico como se muestra en la figura.

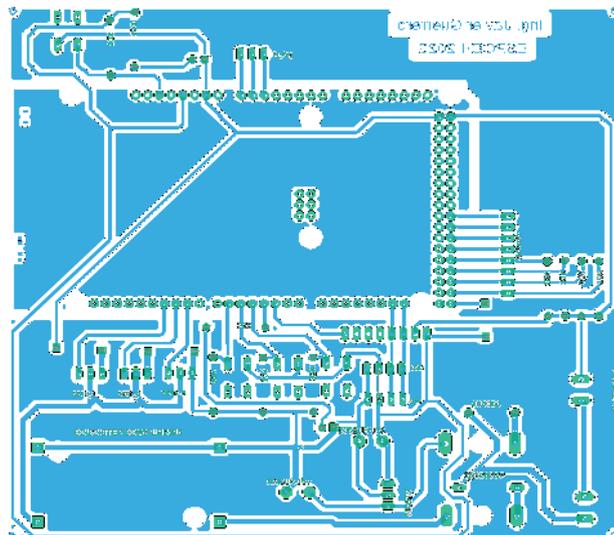


Figura 58-5. Placa circuito eléctrico

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

Los componentes que conforman el sistema eléctrico del prototipo exoesqueleto son:

Tabla 24-5: Elementos que conforman el sistema eléctrico

| Componente | Cantidad |
|----------------------------------|----------|
| Arduino Mega | 1 |
| Espadines hembra | 2 |
| Espadin macho | 1 |
| r10k 1/2w | 4 |
| Fusibles | 2 |
| Borneras de 2 pines | 2 |
| Modulo regulador de 5ª step down | 1 |
| Regulador LM7805 | 1 |
| Kit de disipador | 1 |
| Capacitores de 470uf /16v | 2 |
| Resistencias 220 ohms 1/2w | 3 |
| Molex de 3 pines | 3 |
| Molex de 8 pines | 2 |
| Molex de 4 pines | 1 |
| Sw pequeño | 1 |
| Servomotores digitales de 30k | 3 |
| Lcd 20x4 con i2c | 1 |
| Placa 20x30 | 1 |
| Teclado 4x4 membrana | 1 |
| Diodos rectificadores | 2 |
| Pulsador mediano | 1 |
| Diodos led | 2 |
| Cloruro férrico | 2 |
| Metros de cable de bus | 1 |
| Metro de estaño | 3 |
| Fuente de poder | 1 |
| MPU 6053 | 1 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

En la figura se observa los componentes conectados para el funcionamiento de los servomotores.

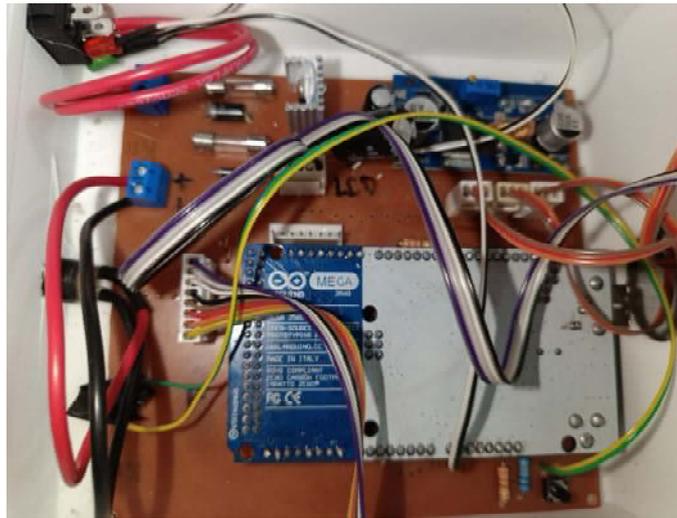


Figura 59-5. Componentes circuito eléctrico

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

El prototipo exoesqueleto dispone adicional de una pantalla LCD y un teclado



Figura 60-5. Pantalla LCD y teclado de prototipo

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

5.3.6 Montaje del prototipo exoesqueleto

Cada etapa del prototipo exoesqueleto para el montaje tiene su determinado tiempo.

5.3.6.1. Montaje de impresión 3D

El tiempo de montaje de cada elemento se indica en la tabla.

Tabla 25-5: Montaje de elementos impresos en 3D

| Montaje de elementos impresos en 3D | | |
|-------------------------------------|---------|--------------|
| Operación | Símbolo | Tiempo (min) |
| Montaje de piezas | M1 | 30 |
| Ajuste de pernos | M2 | 25 |
| SUBTOTAL | | 55 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023



Figura 61-5. Montaje de elementos impresos

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

5.3.6.2 Montaje sistema motriz

El tiempo de montaje de cada elemento se indica en la tabla.

Tabla 26-5: Tiempo de montaje de elementos impresos en 3D

| Montaje sistema motriz | | |
|------------------------|---------|--------------|
| Operación | Símbolo | Tiempo (min) |
| Montaje motores | M3 | 20 |
| SUBTOTAL | | 20 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023



Figura 62-5. Montaje de motores

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

5.3.6.3. Montaje sistema eléctrico

El tiempo de montaje de cada elemento se indica en la tabla.

Tabla 27-5: Tiempo de montaje sistema eléctrico

| Montaje sistema eléctrico | | |
|-----------------------------------|---------|--------------|
| Operación | Símbolo | Tiempo (min) |
| Diseño de esquema | M4 | 1200 |
| Diseño de placa | M5 | 1080 |
| Construcción de PBC | M6 | 1440 |
| Prueba de placa | M7 | 120 |
| Programación y prueba de programa | M8 | 1920 |
| SUBTOTAL | | 5760 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

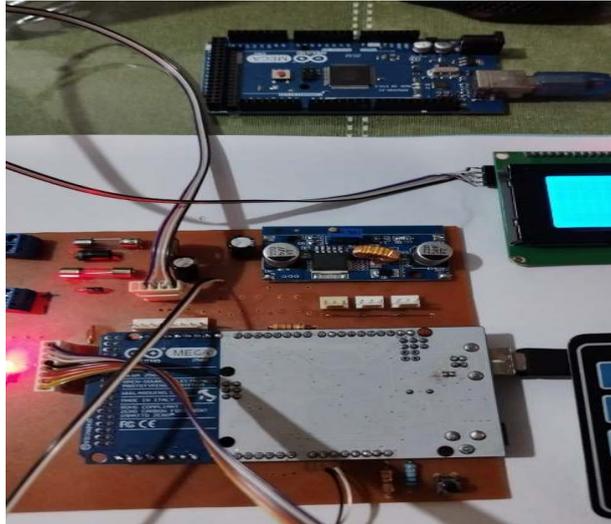


Figura 63-5. Montaje de componentes eléctricos

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

5.3.7 Flujograma de montaje de prototipo exoesqueleto.

Permite conocer las operaciones de montaje del equipo.

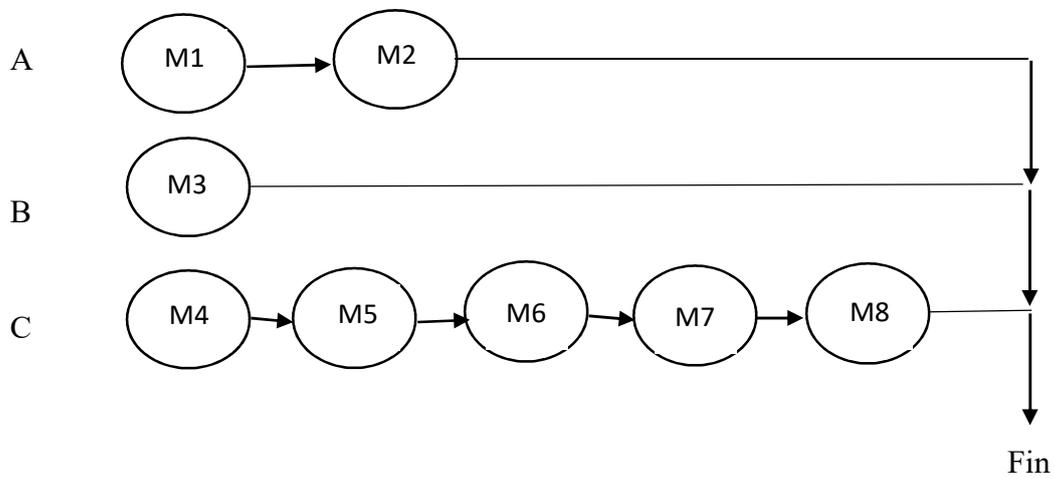


Figura 64-5. Flujograma de montaje del prototipo

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

En la tabla muestra los tiempos de construcción y montaje del prototipo exoesqueleto.

Tabla 28-5: Tiempos de construcción y montaje

| Proceso | Tiempo (min) | Tiempo (h) |
|------------------------|--------------|------------|
| Tiempo de construcción | 10273 | 171.21 |
| Tiempo de montaje | 5835 | 97.25 |
| Tiempo total | 16108 | 268.46 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023



Figura 65-5. Prototipo exoesqueleto

Fuente: Guerrero, Javier, 2023

5.4 Análisis de costos de prototipo exoesqueleto

Es un estudio de costos del prototipo exoesqueleto el cual se basa en los costos de la materia prima para su fabricación.

5.4.1 Costos directos

Es aquella que se relaciona con la producción y en el prototipo exoesqueleto.

5.4.1.1 Costos de materiales

Se identifica como un costo importante en la construcción del exoesqueleto

Tabla 29-5: Costo de construcción del prototipo exoesqueleto

| Descripción | Unidad | Precio unitario (USD) | Cantidad | Sub. Total (USD) |
|----------------------------------|--------|-----------------------|----------|------------------|
| Filamento PLA blanco | Kg | 24 | 2 | 48 |
| Filamento ABS blanco | Kg | 26 | 1 | 26 |
| Base acrílico | Und | 25 | 1 | 25 |
| Sujeciones | Und | 3.25 | 4 | 15 |
| Pernos y tuercas | Und | 0.08 | 100 | 8 |
| Arduino Mega | Und | 30 | 1 | 30 |
| Espadines Hembra | Und | 0.6 | 2 | 1.2 |
| Espadin macho | Und | 0.6 | 1 | 0.6 |
| r10k 1/2w | Und | 0,05 | 4 | 0.2 |
| Fusibles | Und | 0,2 | 2 | 0.4 |
| Borneras de 2 pines | Und | 0,3 | 2 | 0.6 |
| Modulo regulador de 5ª step down | Und | 10 | 1 | 10 |
| Regulador LM7805 | Und | 1,2 | 1 | 1.2 |
| Kit de disipador | Und | 1 | 1 | 1 |
| Capacitores de 470uf /16v | Und | 0,2 | 2 | 0.4 |
| Resistencias 220 ohms 1/2w | Und | 0,05 | 3 | 0.15 |
| Molex de 3 pines | Und | 0,7 | 3 | 2.1 |
| Molex de 8 pines | Und | 1,2 | 2 | 2.4 |
| Molex de 4 pines | Und | 0,7 | 1 | 0.7 |
| Sw pequeño | Und | 0,8 | 1 | 0.8 |
| Servomotores digitales de 30k | Und | 40 | 3 | 120 |
| Lcd 20x4 con i2c | Und | 15 | 1 | 15 |
| Placa 20x30 | Und | 3,5 | 1 | 3.5 |
| Teclado 4x4 membrana | Und | 5 | 1 | 5 |
| Diodos rectificadores | Und | 0,2 | 2 | 0.4 |
| Pulsador mediano | Und | 0,4 | 1 | 0.4 |
| Diodos led | Und | 0,2 | 2 | 0.4 |
| Cloruro férrico | Und | 0,5 | 2 | 1 |
| Cable de bus | m | 5 | 1 | 5 |
| Estaño | m | 0,85 | 3 | 2.65 |
| Fuente de poder | Und | 12 | 1 | 12 |
| MPU 6053 | Und | 8 | 1 | 8 |
| SUBTOTAL | | | | 347.5 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

5.4.1.2 Mano de obra

Hace referencia al recurso humano empleado en la construcción del prototipo exoesqueleto.

Tabla 30-5: Mano de obra de construcción del prototipo exoesqueleto

| Descripción | Salario Real / Hora | Horas - Hombre | Sub. Total (USD) |
|---------------------|---------------------|----------------|------------------|
| Ayudante en general | 3.5 | 10 | 35 |
| SUBTOTAL | | | 35 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

5.4.1.3 Equipos y herramientas

Está relacionado con los equipo y herramientas que se usaron para construir cada componente del prototipo exoesqueleto.

Tabla 31-5: Costo de equipos y herramientas para la construcción del prototipo exoesqueleto

| Descripción | Costo Hora | Horas de Equipo | Subtotal (USD) |
|-----------------------|------------|-----------------|----------------|
| Impresora 3 D | 1.2 | 171.2 | 205.4 |
| Calibrador pie de rey | 0,9 | 2 | 1.8 |
| Flexómetro | 0,8 | 1 | 0.8 |
| Herramientas menores | 1,08 | 5 | 5.4 |
| SUBTOTAL | | | 213.4 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

5.4.1.4 Coste de transporte

Se refiere al costo de transporte que se ha usado para la compra de insumos para la construcción entre ellos taxis, gasolina. El costo de movilización de los equipos al lugar de construcción es de 30 USD.

5.4.1.5 Costo total directo

Es la suma de todos los subtotales directos que se obtuvieron en las tablas anteriores que son necesarias para la construcción del prototipo exoesqueleto. El cual se representa en la tabla siguiente.

Tabla 32-5: Costo total directo para la construcción del prototipo exoesqueleto

| Descripción | Costo |
|---------------------------------|-------|
| Costo de materiales | 347.5 |
| Costo de mano de obra | 35 |
| Costo de equipos y herramientas | 213.4 |
| Transporte | 30 |
| Total costos directos | 625.9 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

5.4.2 Costos indirectos

Es el costo que interviene en la construcción del equipo como los costos ingenieriles, el cual tiene un agregado que involucra a la supervisión, diseño y construcción.

Tabla 33-5: Costo indirecto para la construcción del prototipo exoesqueleto

| Costos ingenieriles | Cantidad (Und) | Unidad | Precio unitario (USD) | Precio total (USD) |
|---------------------|----------------|--------|-----------------------|--------------------|
| Supervisión | 5 | Horas | 8 | 40 |
| Diseño | 20 | Horas | 8 | 160 |
| Subtotal | | | | 200 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

El costo total indirecto es la suma del costo ingenieril e imprevistos

Tabla 34-5: Costo total indirecto para la construcción del prototipo exoesqueleto

| Costos | Precio Total (USD) |
|--------------|--------------------|
| Ingenieriles | 200 |
| Imprevistos | 50 |
| Subtotal | 250 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

5.4.3 Costo total

Los costos totales de la construcción del prototipo exoesqueleto es la suma de costos directos e indirectos.

Tabla 35-5: Costo total para la construcción del prototipo exoesqueleto

| Costo Total | Dólares (USD) |
|-------------------|---------------|
| Costo directos | 625.9 |
| Costos Indirectos | 250 |
| Total | 875.9 |

Fuente: El Autor

Realizado por: Guerrero, Javier, 2023

CONCLUSIONES

El prototipo automático de exoesqueleto con manufactura aditiva es capaz de desarrollar los movimientos de la muñeca para simular movimientos mecánicos en la rehabilitación de las muñecas en personas adultas para la cual se validaron los movimientos con un goniómetro teniendo un porcentaje de error promedio de 1.14% para la mano izquierda y 1% para la mano derecha en pruebas en vacío en cambio un error promedio de 1.71% para la mano izquierda y 1.9% para la mano derecha en pruebas con carga.

Mediante softwares computacionales se estableció la cinemática y dinámica de los movimientos que generará el prototipo exoesqueleto en la rehabilitación de la muñeca, lo cual permitió seleccionar los servomotores DS3220 PRO 30KG el cual posee un torque par de bloqueo de 39.5 kg/cm que permitan desarrollar los movimientos sin inconvenientes.

La simulación computacional mediante software CAE permitió validar la resistencia estructural teniendo un factor de seguridad de 15 para caso estático y 10.4 para caso dinámico además permitió la verificación de movimientos antes de la etapa de la construcción.

Se validó el funcionamiento del prototipo exoesqueleto con una especialista en fisioterapia para verificar cada una de los movimientos, de acuerdo a las pruebas realizadas se determinó que el prototipo es capaz de generar movimientos como flexión, extensión, aducción, abducción, pronación y supinación que permitan la rehabilitación de la muñeca en pacientes.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que el uso del prototipo de exoesqueleto sea supervisado por especialistas en fisioterapia el cual regule las series, el tiempo en la rehabilitación de acuerdo al tratamiento y patología.

El prototipo exoesqueleto debe ser usado por pacientes que requieran una rehabilitación de muñeca.

Se recomienda colocar el prototipo exoesqueleto en un lugar donde el paciente se encuentre sentado con una postura correcta para tener mejor resultado en la rehabilitación.

Para el uso del prototipo de exoesqueleto el especialista debe conocer el funcionamiento del equipo, para lo cual se anexa el manual de operaciones.

El prototipo de exoesqueleto posee un botón de parada de emergencia el cual permite detener la terapia en cualquier momento.

En caso que la programación se borre del prototipo exoesqueleto por motivo de variación de voltaje el especialista puede volver a cargar la programación mediante un cable de datos por puerto USB desde la computadora.

GLOSARIO

Abducción: movimiento en que una parte del cuerpo se aleja respecto al plano de simetría medial.

Aducción: Movimiento por el cual un miembro o un órgano cualquiera se acerca al plano medio del cuerpo

Arduino: Es un microcontrolador, el cual controla y alimenta determinados dispositivos y toma decisiones e interactúa con el mundo físico gracias a sensores y actuadores.

Exoesqueleto: Estructura que sirven de apoyo y asistencia para los movimientos, o para aumentar las capacidades del cuerpo humano.

Extensión: Movimiento de separación entre huesos o partes del cuerpo, en dirección posteroanterior.

Flexión: Movimientos del cuerpo hacia adelante y hacia atrás, disminución del ángulo entre dos huesos

Goniómetro: Herramienta manual que tiene como objetivo facilitar la medición de ángulos.

Pronación: Es aquel movimiento en el que se realiza un giro o una rotación hacia el interior de la línea media

Prototipo: Primer modelo que sirve como representación o simulación del producto final, que permite verificar el diseño y confirmar que cuenta con las características específicas planteadas.

Supinación: Movimiento del antebrazo que hace girar la mano de dentro a fuera, presentando la palma.

BIBLIOGRAFÍA

Barrera, Daniela Verónica Lema. 2013. *Comparación estadística de medidas antropométricas entre mestizos, indígenas y afro ecuatorianos de la Región Sierra del Ecuador* . Quito : UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO , 2013.

Cárdenas, Pablo César Ávila. 2018. *DESARROLLO DE UN PROTOTIPO AUTOMÁTICO PARA REHABILITACIÓN DE MUÑECAS CON 2 GRADOS DE LIBERTAD*. Cuenca : UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2018.

Cardoso, Julio Tovar. 2020. Física Mecánica. [En línea] 2020. <https://juliotovar.wixsite.com/fis-mec/movimiento-mecanico>.

Castañeda, José Santiago Bohórquez. 2020. *Simulación de análisis dinámicos de membranas electrohiladas de ácido poliláctico (PLA) con grafeno*. Tunja, Colombia : Universidad Antonio Nariño, 2020.

Champi, Luis Enrique Huanca. 2020. *DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MANO PARA LA AUTO-TERAPIA ASISTIDA EN BASE A UN PATRÓN DE MOVIMIENTO*. Lima : PUCP, 2020.

CLAUSER, CHARLES E. 1969. *WEIGHT, VOLUME, AND CENTER OF MASS OF SEGMENTS OF THE HUMAN BODY*. Ohio : PATTERSON AIR FORCE BASE, 1969.

Diseño de un Dispositivo de Rehabilitación para la Articulación de Muñeca desde el Enfoque de la Ingeniería Concurrente. **Morales, Edgar Ceballos. 2017.** 2017, HAL open science, págs. 78-103.

Diseño de un rehabilitador para muñeca. **Toapanta, Gissela. 2017.** 2017, Memorias del I Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación, págs. 263-274.

Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. **Alejandro, Cardona Chávez Manuel. 2020.** 2020, Revista Ingeniería Biomedica, págs. 63-73.

G. Mosquera, G. Toapanta. 2019. *Dispositivo mecatrónico* . Ibarra : Universidad Técnica del Norte, 2019.

Kutuk, M. Erkan. 2019. *An Exoeskeleton Design Robotic Assisted Rehabilitation: Wrist & Forearm*. Canada : Springer Nature Switzerland, 2019.

Mendez, Deira Sosa. 2017. *DESARROLLO DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DEL HOMBRO*. México : Universidad Tecnológica de la MIXTECA, 2017.

Norton, Robert. 2013. *Diseño de Maquinaria Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. México : McGRAW-HILL, 2013.

Ortiz, Jennifer. 2018. *EVALUACION ANTROPOMETRICA DE MANOS EN ESTUDIANTES DE LA EVALUACION ANTROPOMETRICA DE MANOS EN ESTUDIANTES DE LA UNA BASE DE DATOS ANTROPOMETRICA DE MANO APLICADA EN EL REDISEÑO DE UN EXOESQUELETO*. Quito : PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR , 2018.

Osejos, Jaime Vinicio Molina. 2016. *CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES TERMOPLÁSTICOS DE ABS Y PLA SEMI-RÍGIDO IMPRESOS EN 3D CON CINCO MALLADOS INTERNOS DIFERENTES*. Quito : Escuela Politécnica Nacional, 2016.

Pozo, Juan Carlos García. 2014. *SIMULACIÓN DE LA MANO HUMANA MEDIANTE MATLAB / SIMMECHANICS*. Madrid : Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 2014.

Prototipo de mano robótica inspirada en la mano humana. **García, Andrés F. 2016.** 2016, Tekhne, págs. 27-42.

Riba, Carles. 2002. *Diseño concurrente*. Barcelona : UPC, 2002.

Sailema, Eliza Verónica Sailema. 2021. *MODELACIÓN DE UN PROTOTIPO REHABILITADOR DE MUÑECAS PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD MOTRIZ*. COTOPAXI : UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI , 2021.

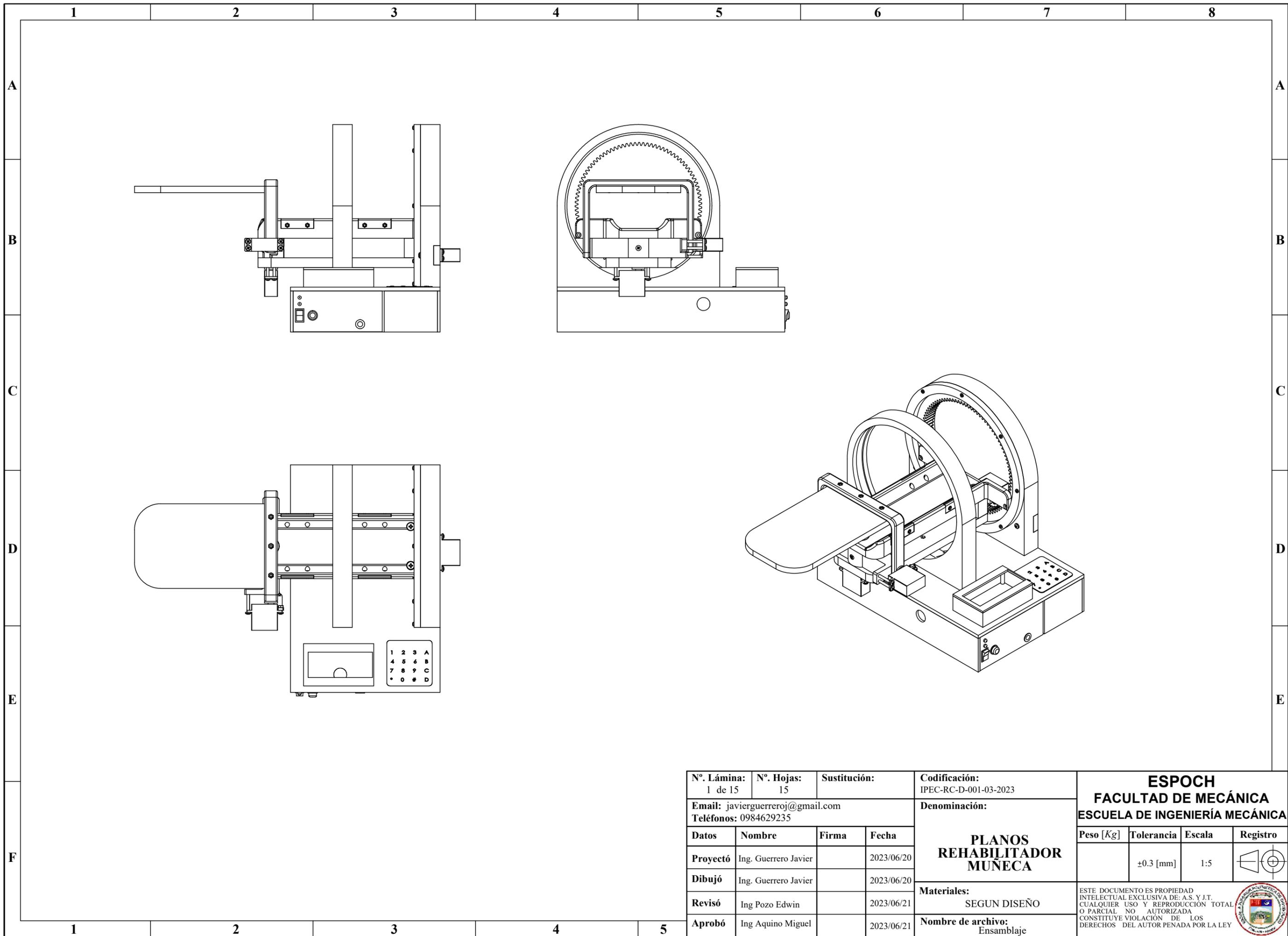
Taboadela, Claudio H. 2007. *Goniometría*. Buenos Aires : ASOCIART SA ART, 2007.

Tratamiento quirúrgico de las fracturas de muñeca. **Sanchez, Eduardo Gómez. 2011.** 2011, medigraphip, págs. 31-38.

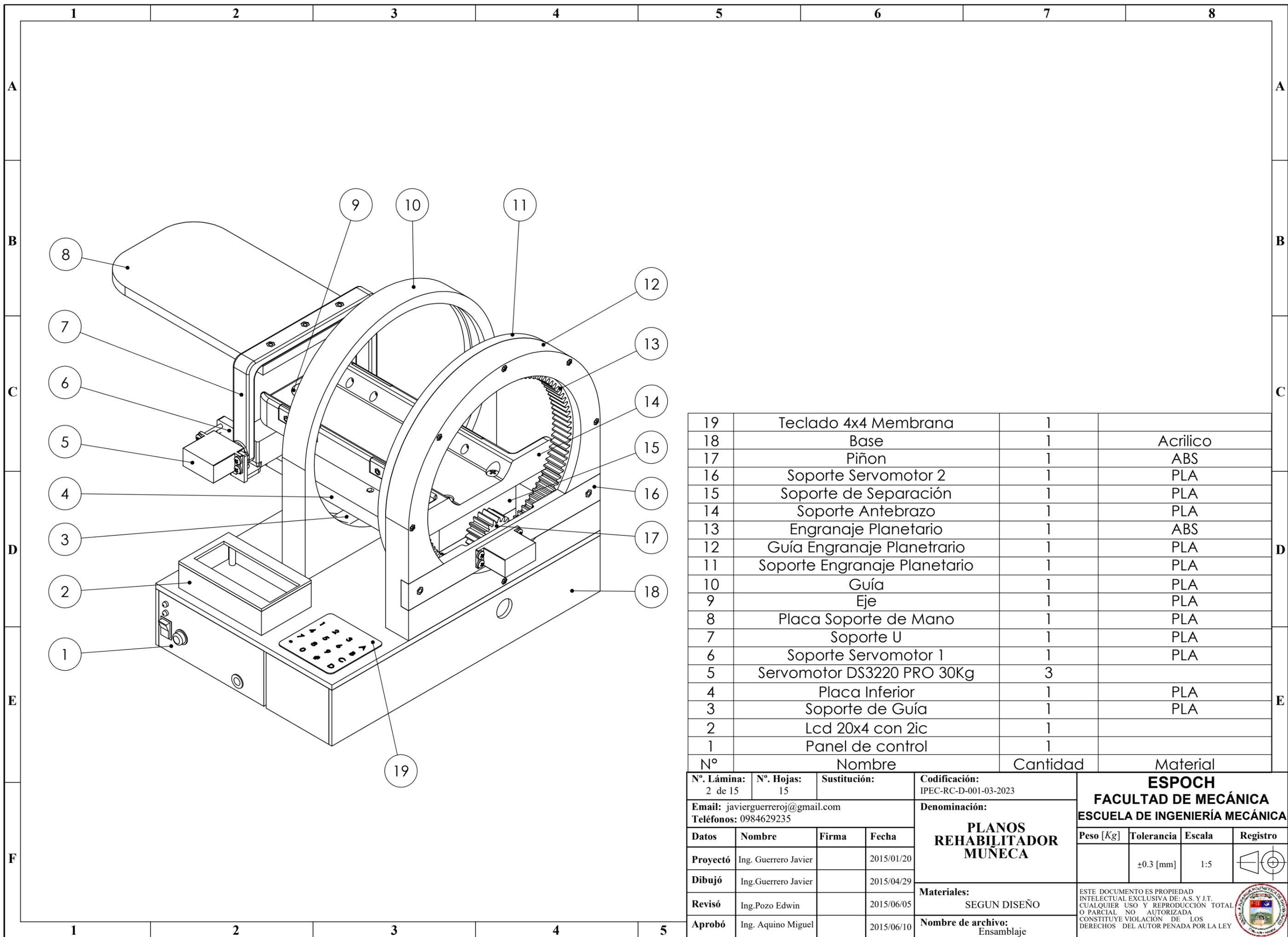
Trelles, Cinthya Mariuxi Torres. 2015. *LAS FRACTURAS DE RADIO DISTAL TIPOS Y COMPLICACIONES EN PACIENTES MAYORES DE 20 AÑOS*. Guayaquil : Universidad de Guayaquil, 2015.

ANEXOS

ANEXO A: PLANOS

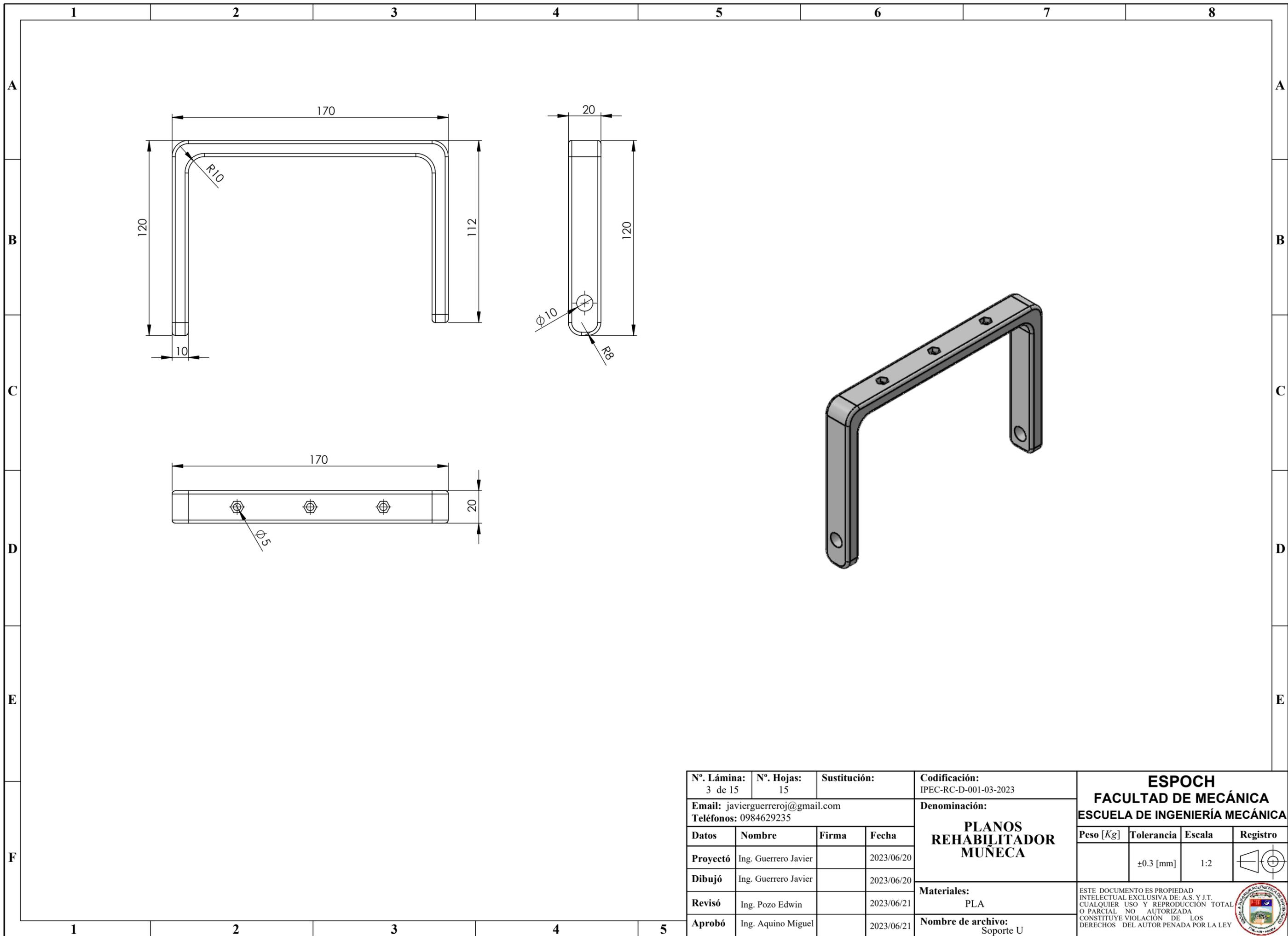


| | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|------------------|--------------|---|--|--|--|---|-----|--|--|
| N°. Lámina: 1 de 15 | | N°. Hojas: 15 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | Denominación: PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | | | | | | |
| Datos | Nombre | Firma | Fecha | Materiales: SEGUN DISEÑO | | | | ±0.3 [mm] | 1:5 | | |
| Proyectó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | | | |
| Dibujó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | | | |
| Revisó | Ing. Pozo Edwin | | 2023/06/21 | | | | | | | | |
| Aprobó | Ing. Aquino Miguel | | 2023/06/21 | | | | | | | | |
| Nombre de archivo: Ensamblaje | | | | <small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY</small> | | | | | | | |

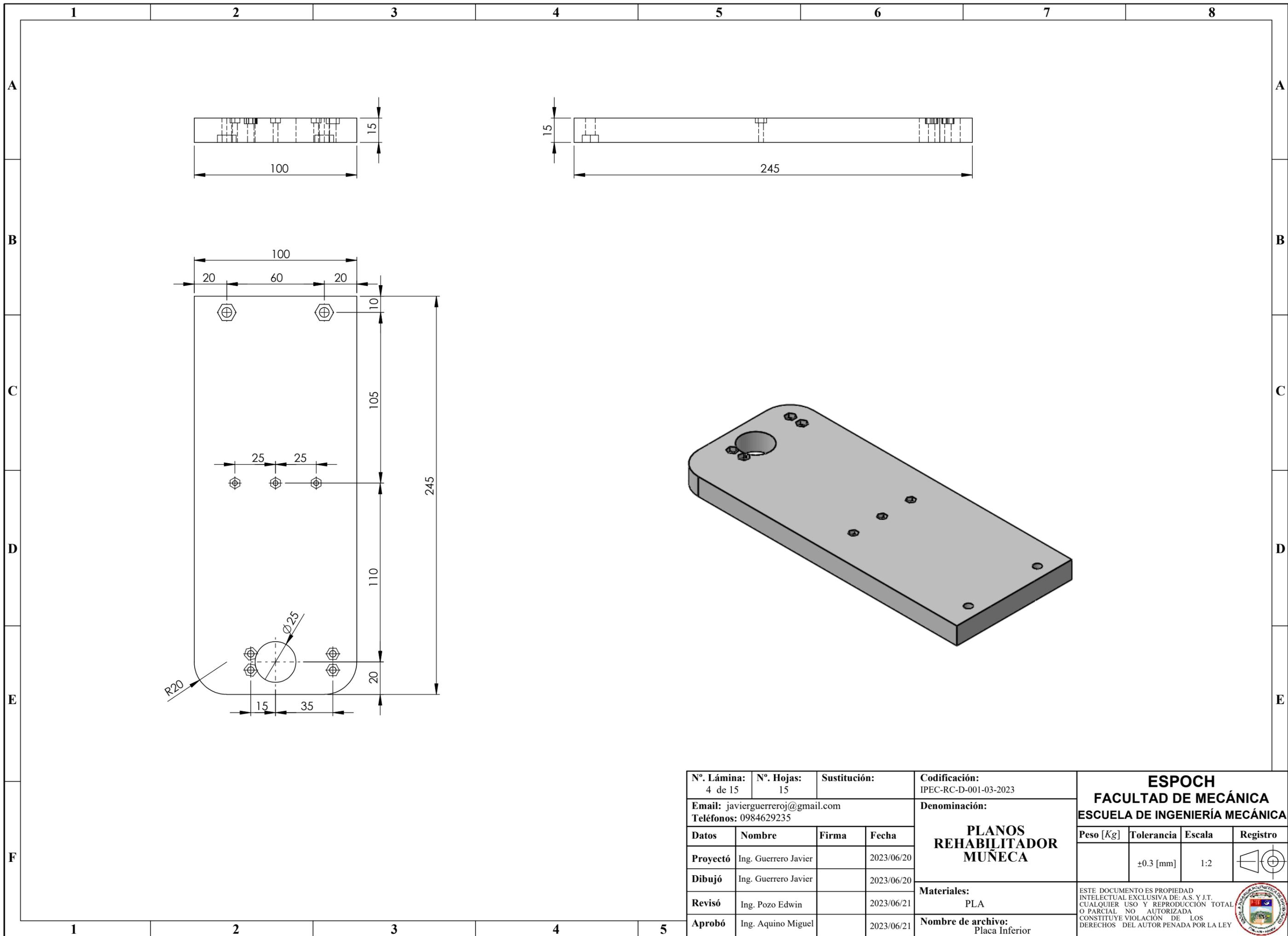


| 19 | Teclado 4x4 Membrana | 1 | |
|----|------------------------------|----------|----------|
| 18 | Base | 1 | Acrilico |
| 17 | Piñon | 1 | ABS |
| 16 | Soporte Servomotor 2 | 1 | PLA |
| 15 | Soporte de Separación | 1 | PLA |
| 14 | Soporte Antebrazo | 1 | PLA |
| 13 | Engranaje Planetario | 1 | ABS |
| 12 | Guía Engranaje Planetario | 1 | PLA |
| 11 | Soporte Engranaje Planetario | 1 | PLA |
| 10 | Guía | 1 | PLA |
| 9 | Eje | 1 | PLA |
| 8 | Placa Soporte de Mano | 1 | PLA |
| 7 | Soporte U | 1 | PLA |
| 6 | Soporte Servomotor 1 | 1 | PLA |
| 5 | Servomotor DS3220 PRO 30Kg | 3 | |
| 4 | Placa Inferior | 1 | PLA |
| 3 | Soporte de Guía | 1 | PLA |
| 2 | Lcd 20x4 con 2ic | 1 | |
| 1 | Panel de control | 1 | |
| N° | Nombre | Cantidad | Material |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|----------------------|--|--|--|-------------------------------------|--|---|--|------------|--|--|--|----------|--|
| N°. Lámina: 2 de 15 | | N°. Hojas: 15 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com | | | | Denominación: | | | | | | | | | | | |
| Teléfonos: 0984629235 | | | | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | | | Peso [Kg] | | Tolerancia | | Escala | | Registro | |
| Proyectó | | Ing. Guerrero Javier | | | | | | Firma | | Fecha | | ±0.3 [mm] | | 1:5 | |
| Dibujó | | Ing. Guerrero Javier | | Firma | | Fecha | | Materiales: SEGUN DISEÑO | | | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | |
| Revisó | | Ing. Pozo Edwin | | Firma | | Fecha | | | | | | | | | |
| Aprobó | | Ing. Aquino Miguel | | Firma | | Fecha | | Nombre de archivo: Ensamblaje | | | | | | | |

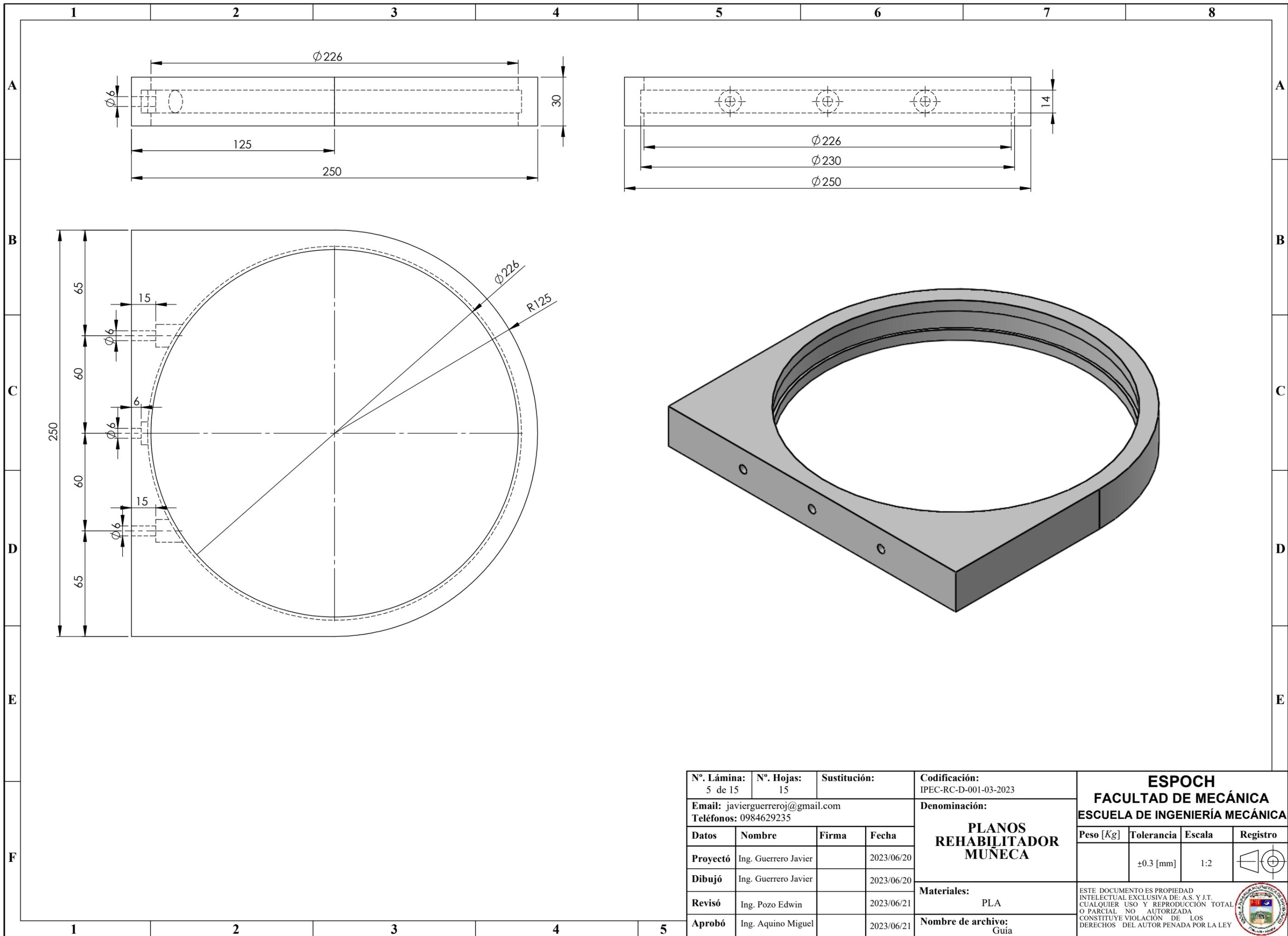


| | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|-------------------------|--------------|--|--|---|--|---|---------------|-----------------|--|
| Nº. Lámina: 3 de 15 | | Nº. Hojas: 15 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | Denominación: PLANOS REHABILITADOR MUNECA | | | | | | | |
| Datos | Nombre | Firma | Fecha | Materiales: PLA | | Peso [Kg] | | Tolerancia | Escala | Registro | |
| Proyectó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | Nombre de archivo: Soporte U | | | | ±0.3 [mm] | 1:2 | | |
| Dibujó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | | | |
| Revisó | Ing. Pozo Edwin | | 2023/06/21 | | | | | | | | |
| Aprobó | Ing. Aquino Miguel | | 2023/06/21 | | | | | | | | |

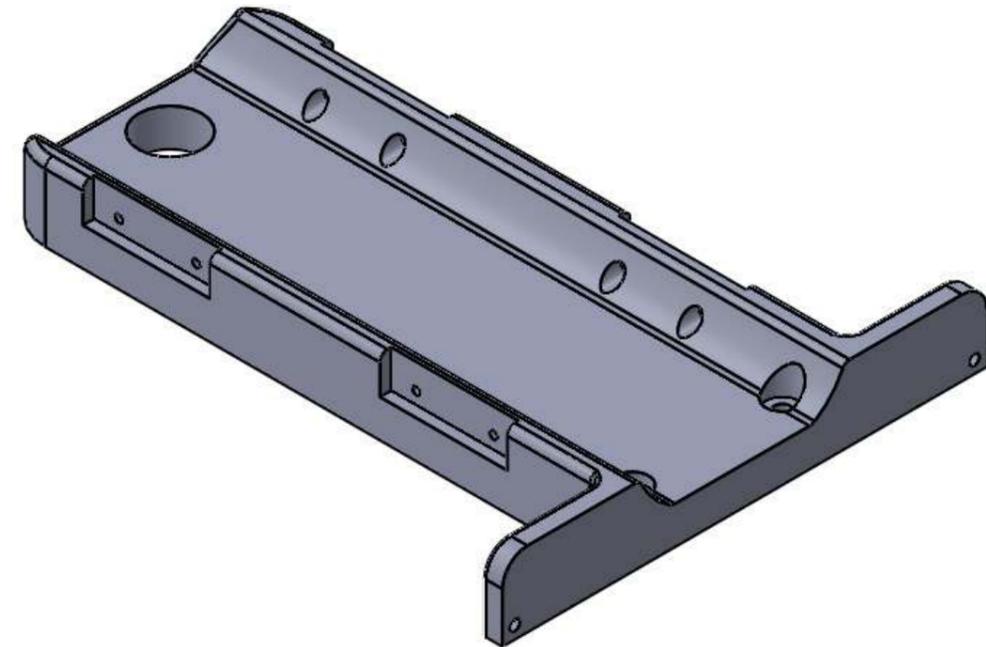
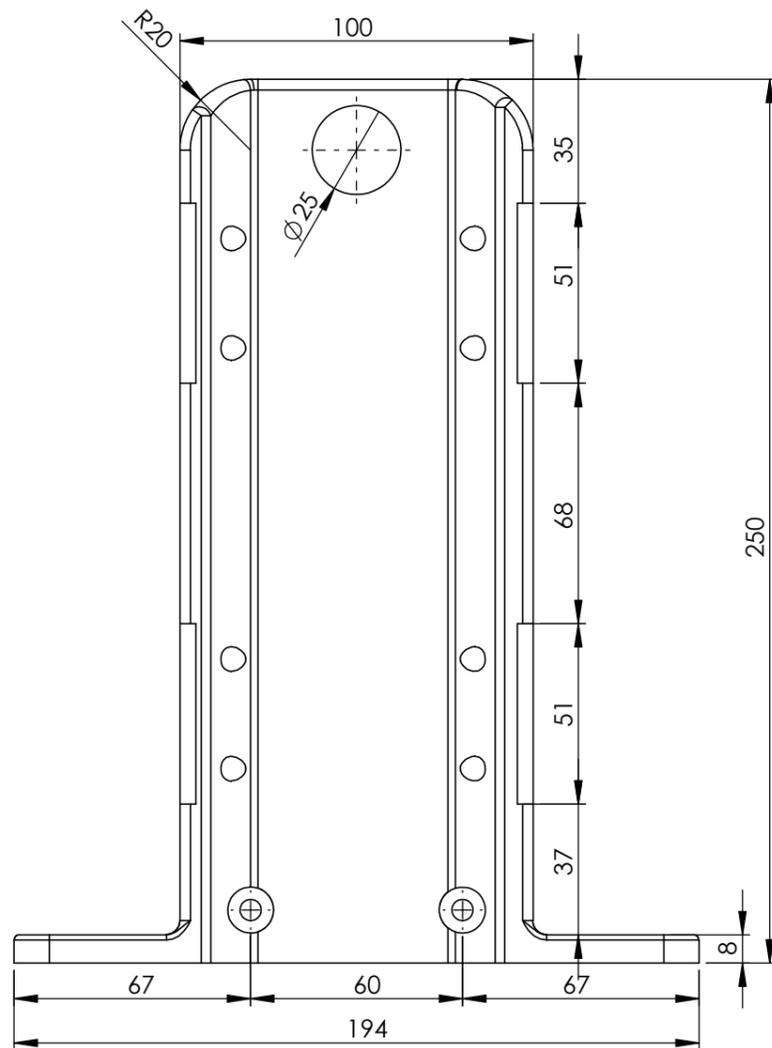
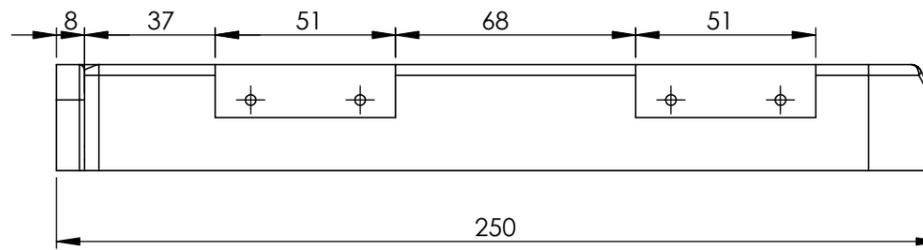
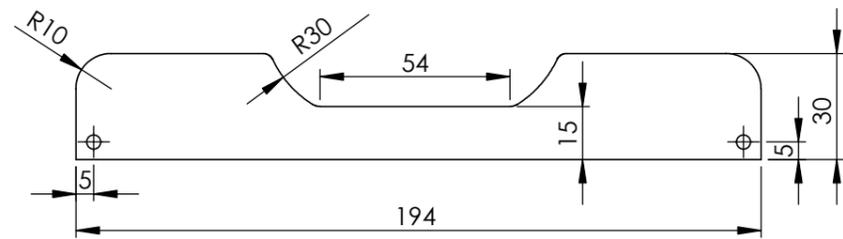


| | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|------------------|--------------|---|--|--|--|---|-------------------|---------------|-----------------|
| Nº. Lámina: 4 de 15 | | Nº. Hojas: 15 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | Denominación: PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | | | | | | |
| Datos | Nombre | Firma | Fecha | Materiales: PLA | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | Peso [Kg] | Tolerancia | Escala | Registro |
| Proyectó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | ±0.3 [mm] | 1:2 | |
| Dibujó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | | | |
| Revisó | Ing. Pozo Edwin | | 2023/06/21 | | | | | | | | |
| Aprobó | Ing. Aquino Miguel | | 2023/06/21 | | | | | Nombre de archivo: Placa Inferior | | | |

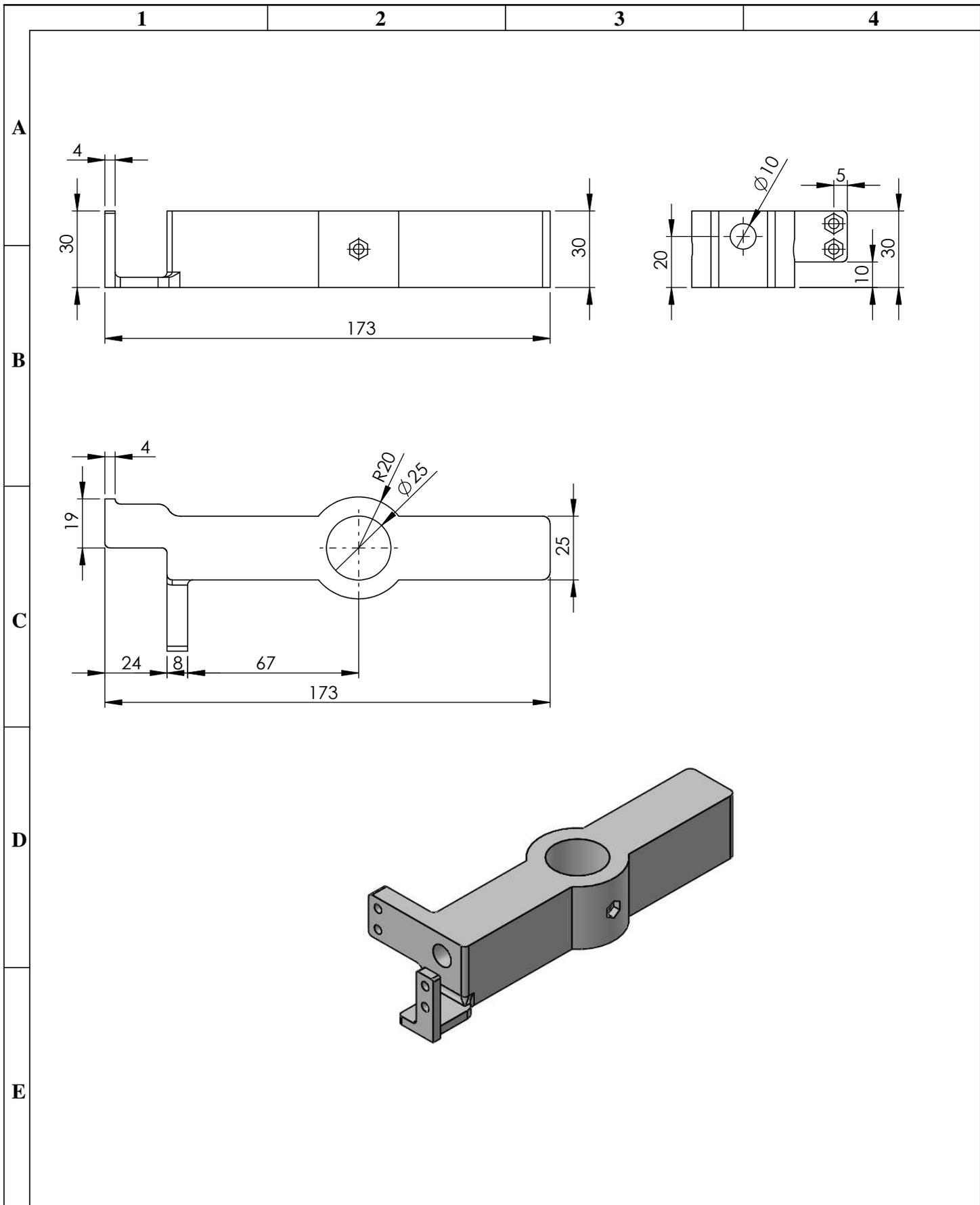




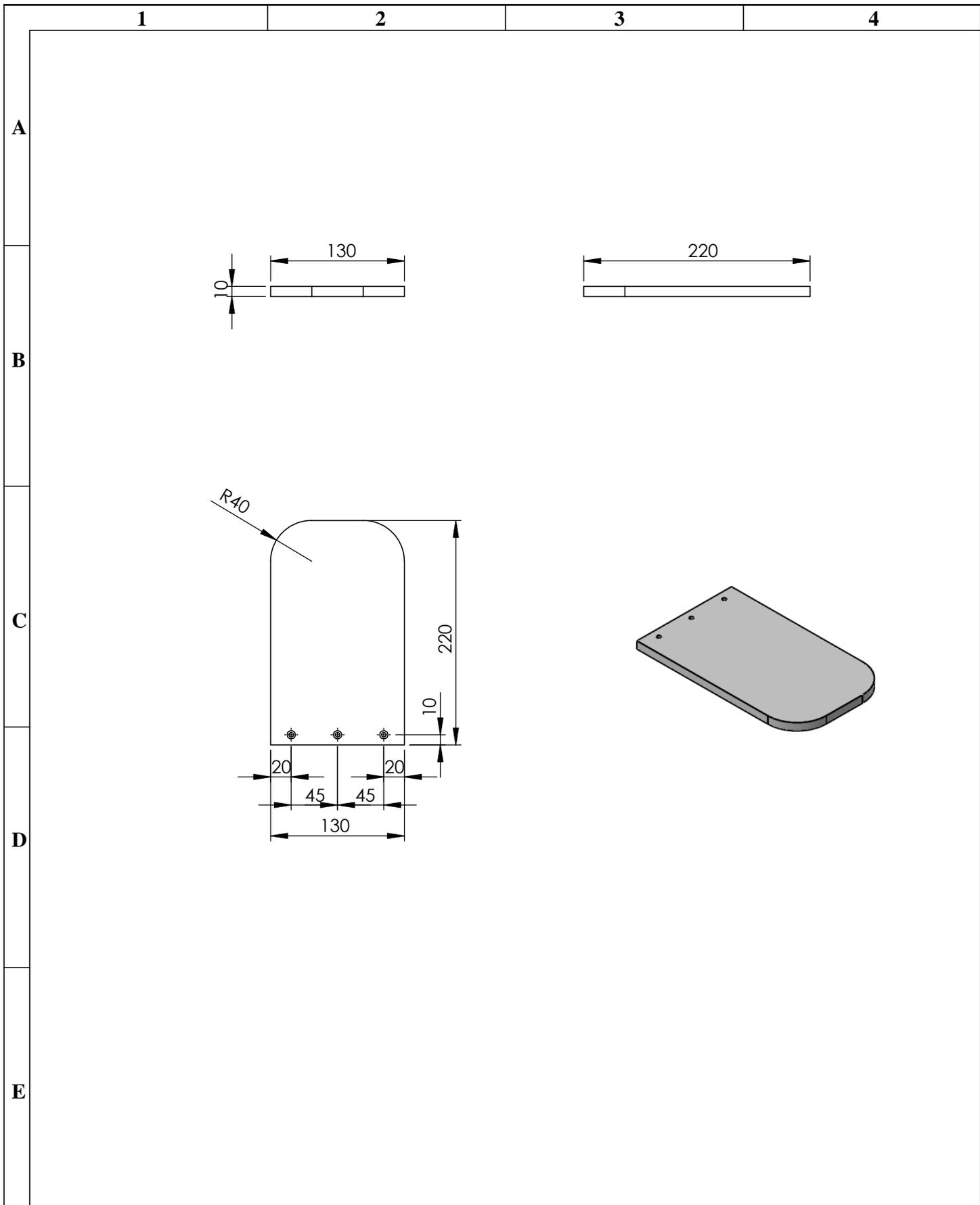
| | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|------------------|--------------|---|--|--|--------------------------------|---|---|---|--|
| N°. Lámina: 5 de 15 | | N°. Hojas: 15 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | Denominación: PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | | | | | | |
| Datos | Nombre | Firma | Fecha | Materiales: PLA | | Peso [Kg] | Tolerancia ±0.3 [mm] | Escala 1:2 | Registro | <small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY</small>  | |
| Proyectó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | |  | | |
| Dibujó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | | | |
| Revisó | Ing. Pozo Edwin | | 2023/06/21 | | | | | | | | |
| Aprobó | Ing. Aquino Miguel | | 2023/06/21 | Nombre de archivo: Guía | | | | | | | |

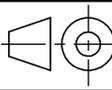


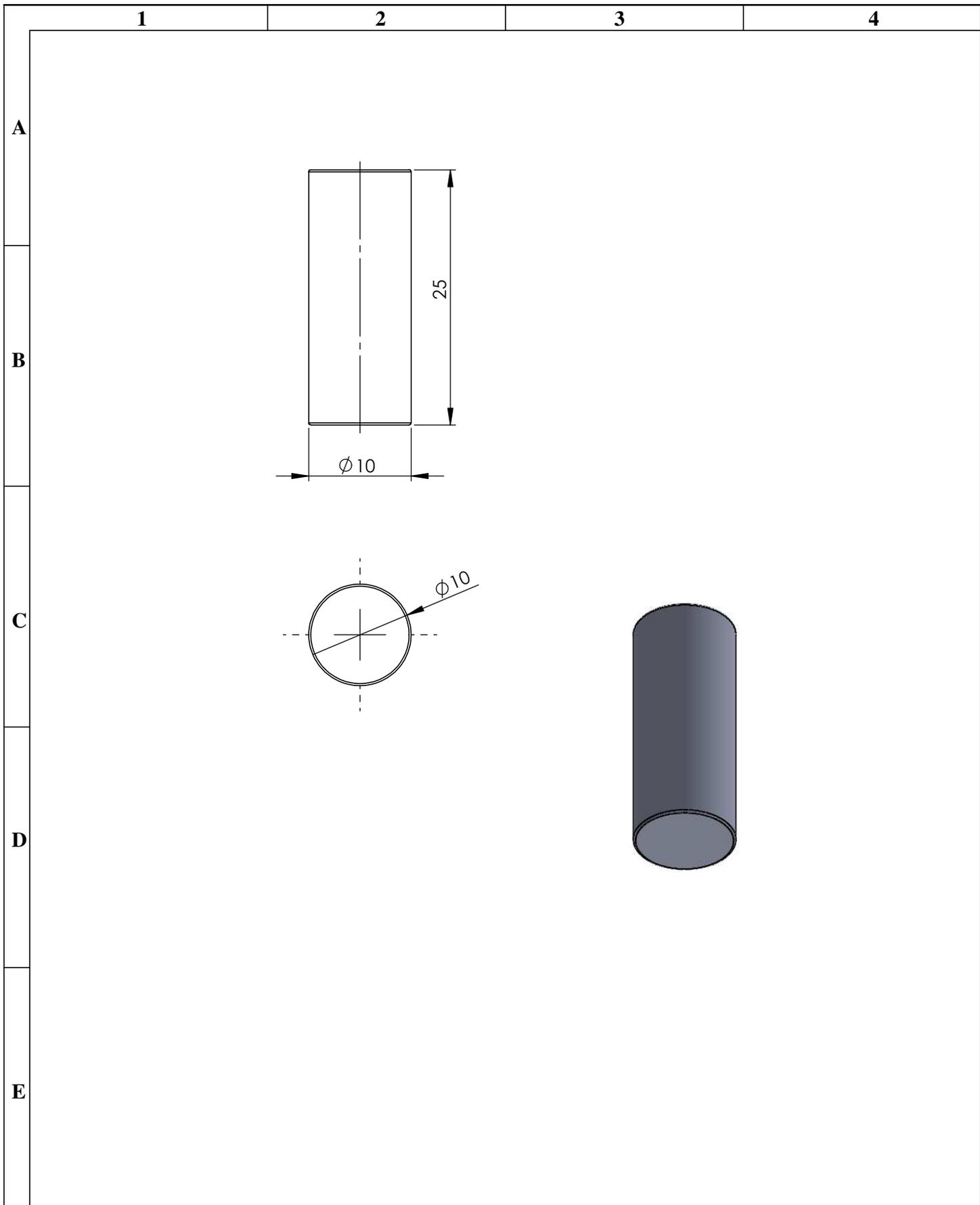
| | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|------------------|------------|--------------------|--|---|--|---|-----|--|--|
| Nº. Lámina: 6 de 15 | | Nº. Hojas: 15 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | Denominación: PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | | | | |
| Datos | Nombre | Firma | Fecha | Materiales: PLA | | Nombre de archivo: Soporte Antebrazo | | <small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY</small> | | | |
| Proyectó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | ±0.3 [mm] | 1:2 | | |
| Dibujó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | | | |
| Revisó | Ing. Pozo Edwin | | 2023/06/21 | | | | | | | | |
| Aprobó | Ing. Aquino Miguel | | 2023/06/21 | | | | | | | | |

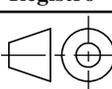


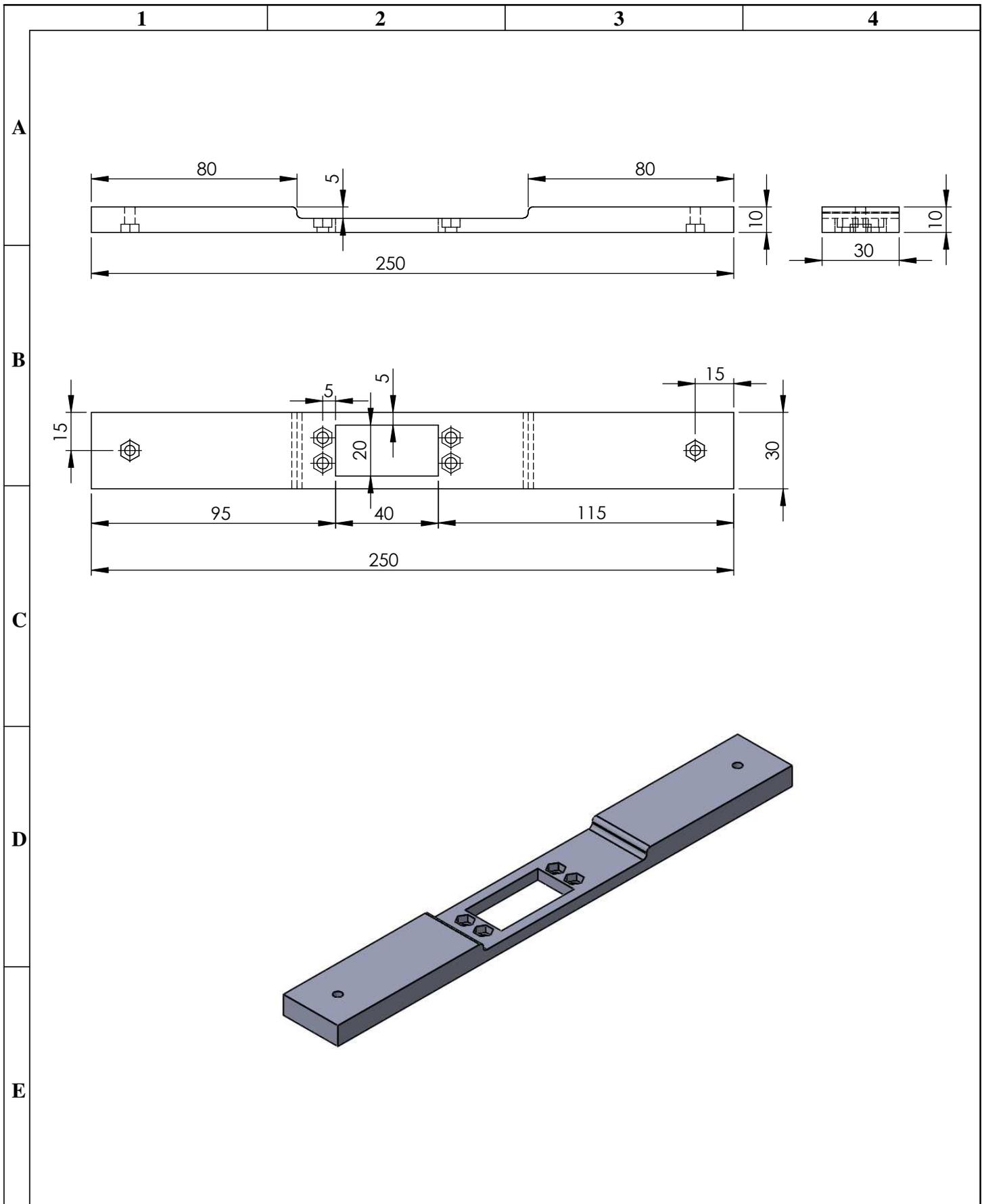
| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|--|--------------|--|--|--|---|--|--|--|--------|--|----------|--|
| N°. Lámina: 7 de 16 | | N°. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | Peso [Kg] | | Tolerancia | | Escala | | Registro | |
| Datos | | Nombre | | Firma | | | | Fecha | | ±0.3 [mm] | | 1:2 | | | |
| Proyectó | | Ing. Guerrero Javier | | | | | | 2023/06/20 | | | | | | | |
| Dibujó | | Ing. Guerrero Javier | | | | 2023/06/20 | | | | | | | | | |
| Revisó | | Ing. Pozo Edwin | | | | 2023/06/21 | | Materiales: PLA | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | |
| Aprobó | | Ing. Aquino Miguel | | | | 2023/06/21 | | Nombre de archivo: Soporte Servomotor 1 | | | | | | | |

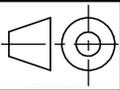


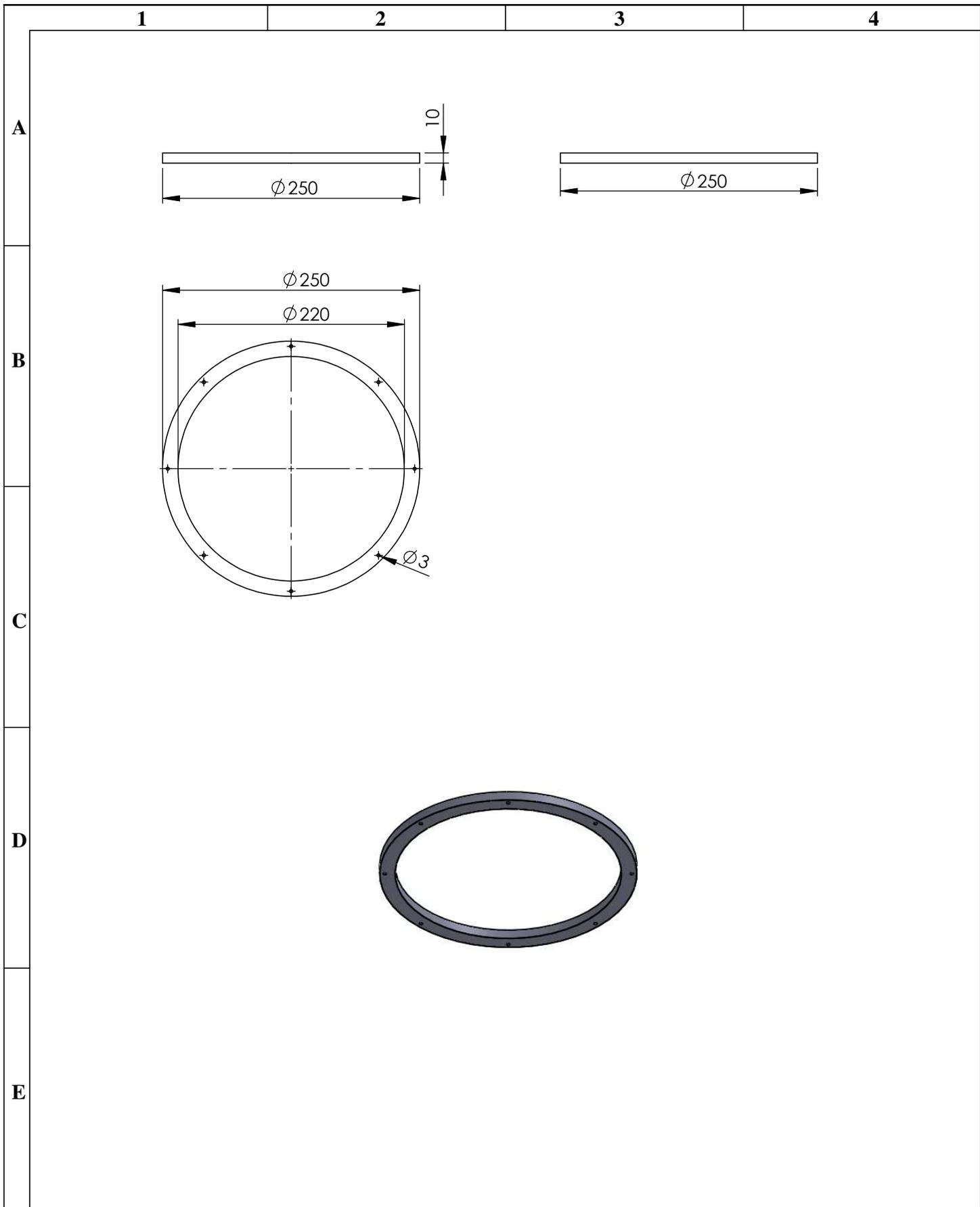
| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|--|--------------|--|--|--|---|--|--|--|--------|--|---|--|
| N°. Lámina: 8 de 16 | | N°. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | Peso [Kg] | | Tolerancia | | Escala | | Registro | |
| Datos | | Nombre | | Firma | | | | Fecha | | ±0.3 [mm] | | 1:5 | |  | |
| Proyectó | | Ing. Guerrero Javier | | | | 2023/06/20 | | Materiales: PLA | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | |
| Dibujó | | Ing. Guerrero Javier | | | | 2023/06/20 | | | | | | | | | |
| Revisó | | Ing. Pozo Edwin | | | | 2023/06/21 | | Nombre de archivo: Placa Soporte de Mano | | | | | | | |
| Aprobó | | Ing. Aquino Miguel | | | | 2023/06/21 | | | | | | | | | |



| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------|--|--|---|--|--|-------------------|---------------|---|
| Nº. Lámina: 9 de 16 | | Nº. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com | | | | | | FACULTAD DE MECÁNICA | | | | | |
| Teléfonos: 0984629235 | | | | | | | | | | | |
| Datos | Nombre | Firma | Fecha | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | | | Peso [Kg] | Tolerancia | Escala | Registro |
| Proyectó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | ±0.3 [mm] | 2:1 |  |
| Dibujó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | | | |
| Revisó | Ing. Pozo Edwin | | 2023/06/21 | Materiales: PLA | | | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | |
| Aprobó | Ing. Aquino Miguel | | 2023/06/21 | Nombre de archivo: Pin | | | | | | | |

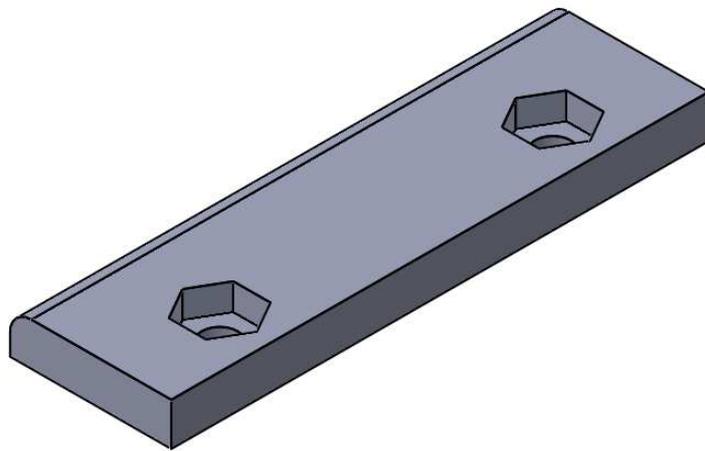
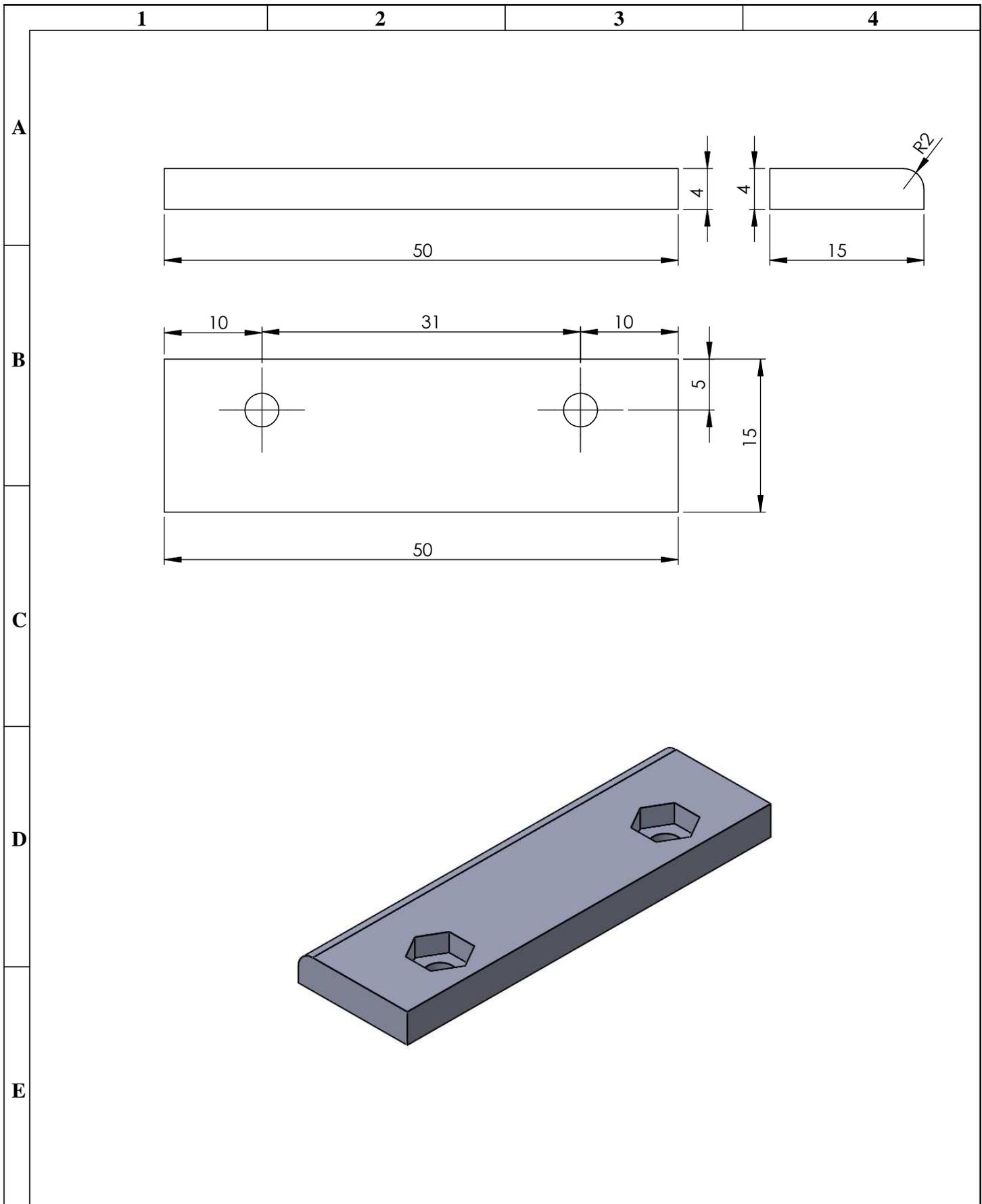


| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|--|--------------|--|--|--|---|--|--|--|--------|--|---|--|
| N°. Lámina: 10 de 16 | | N°. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | | | | |
| Email: javierguerreroj@gamil.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | Peso [Kg] | | Tolerancia | | Escala | | Registro | |
| Datos | | Nombre | | Firma | | | | Fecha | | ±0.3 [mm] | | 1:2 | |  | |
| Proyectó | | Ing. Guerrero Javier | | | | | | 2023/06/20 | | | | | | | |
| Dibujó | | Ing. Guerrero Javier | | | | | | 2023/06/20 | | | | | | | |
| Revisó | | Ing. Pozo Edwin | | | | 2023/06/21 | | Materiales: PLA | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | |
| Aprobó | | Ing. Aquino Muiguel | | | | 2023/06/21 | | Nombre de archivo: Soporte Servomotor 2 | | | | | | | |

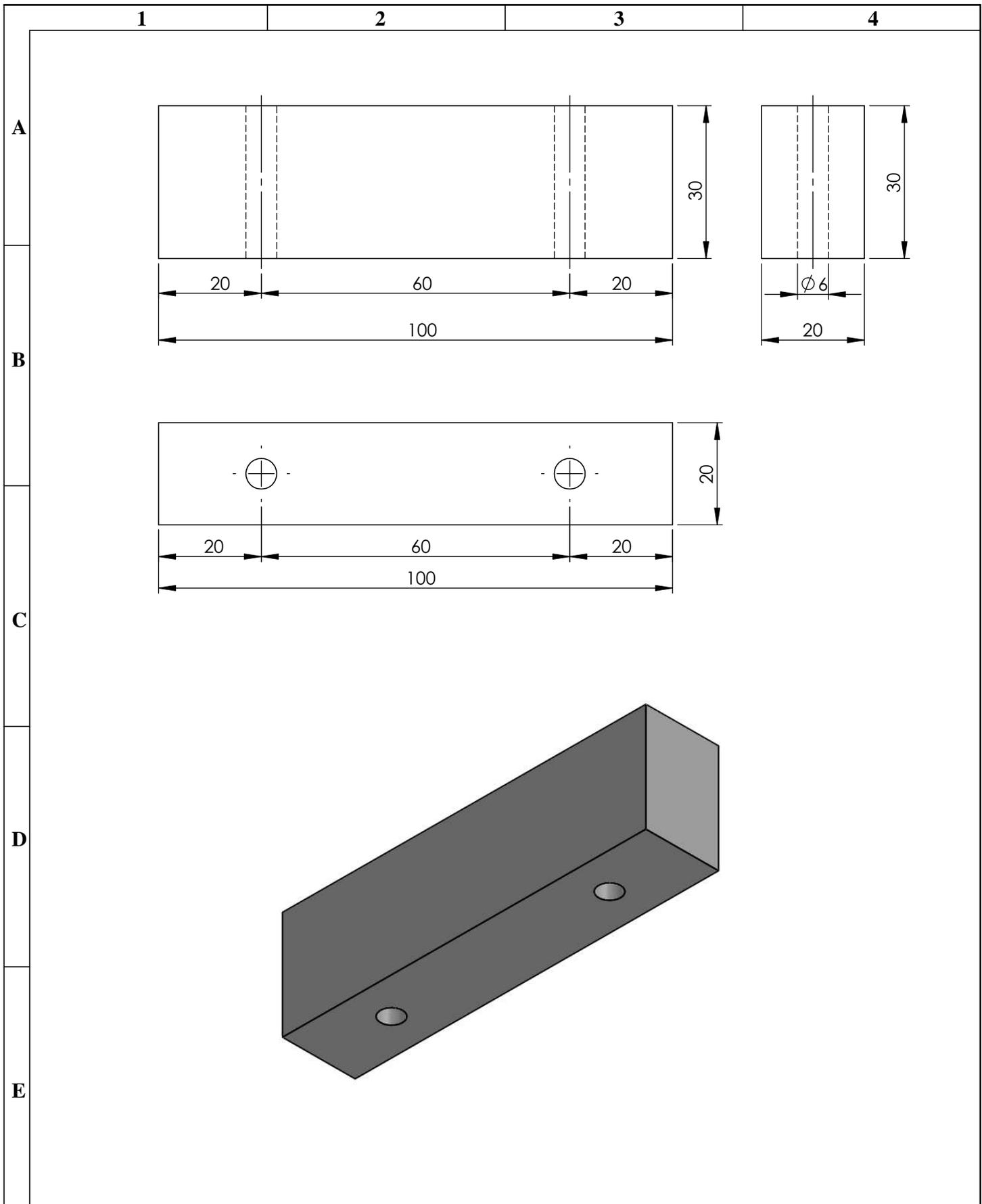


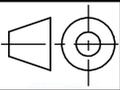
| | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|------------------|--------------|--------------|---|--|--|---|-----|------------|--------|----------|
| N°. Lámina: 11 de 16 | | N°. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | |
| Email: javierguerreroj@gamil.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | Peso [Kg] | | Tolerancia | Escala | Registro |
| Datos | Nombre | Firma | Fecha | | | | | ±0.3 [mm] | 1:5 | | | |
| Proyectó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | | | | |
| Dibujó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | | | | |
| Revisó | Ing. Pozo Edwin | | 2023/06/21 | | Materiales: PLA | | | | | | | |
| Aprobó | Ing. Aquino Miguel | | 2023/06/21 | | Nombre de archivo: Soporte Engrane Planetario | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | |

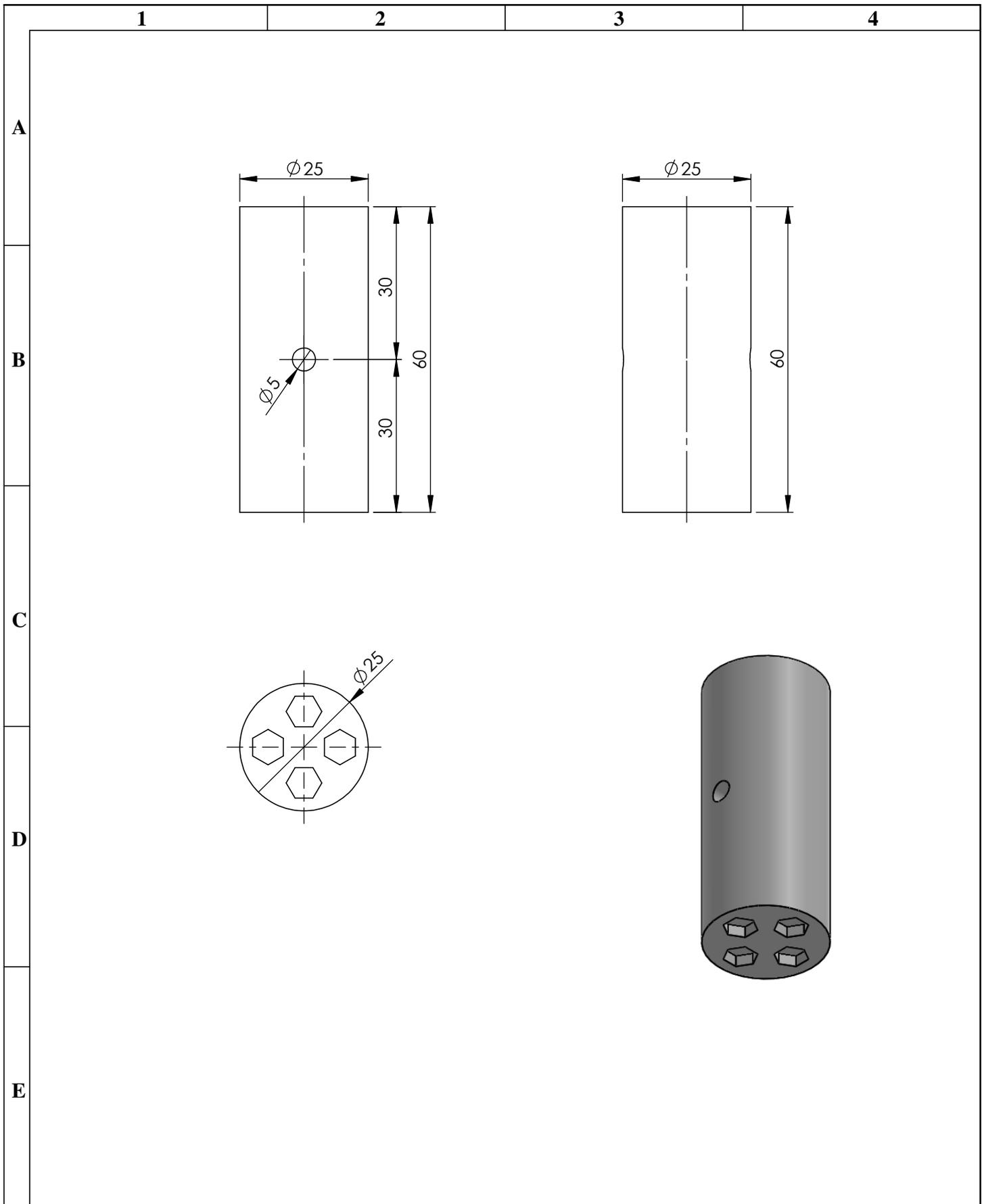




| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|--|--------------|--|--|--|---|--|--|--|--------|--|----------|--|
| N°. Lámina: 12 de 16 | | N°. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | PLANOS REHABILITADOR MUNECA | | Peso [Kg] | | Tolerancia | | Escala | | Registro | |
| Datos | | Nombre | | Firma | | | | Fecha | | ±0.3 [mm] | | 2:1 | | | |
| Proyectó | | Ing. Guerrero Javier | | | | 2023/06/20 | | Materiales: PLA | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | |
| Dibujó | | Ing. Guerrero Javier | | | | 2023/06/20 | | | | | | | | | |
| Revisó | | Ing. Pozo Edwin | | | | 2023/06/21 | | Nombre de archivo: Sujetdor de Correa | | | | | | | |
| Aprobó | | Ing. Aquino Miguel | | | | 2021/06/21 | | | | | | | | | |



| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|-------------------------|--------------|---------------------|--|--|--|---|--|--|--|-------------------|--|---------------|---|
| Nº. Lámina: 13 de 16 | | Nº. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | | | Peso [Kg] | | Tolerancia | | Escala | Registro |
| Datos | Nombre | Firma | Fecha | | | | | | | | | ±0.3 [mm] | | 1:1 |  |
| Proyectó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | Materiales: PLA | | | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | |
| Dibujó | Ing. Guerrero Javier | | 2023/06/20 | | | | | | | | | | | | |
| Revisó | Ing. Pozo Edwin | | 2023/06/21 | | | Nombre de archivo: Soporte de Separación | | | |  | | | | | |
| Aprobó | Ing. Aquino Miguel | | 2023/06/21 | | | | | | | | | | | | |



| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|--|--------------|--|--|--|---|--|--|--|--------|--|----------|--|
| N°. Lámina: 14 de 16 | | N°. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | Peso [Kg] | | Tolerancia | | Escala | | Registro | |
| Datos | | Nombre | | Firma | | | | Fecha | | ±0.3 [mm] | | 1:1 | | | |
| Proyectó | | Ing. Guerrero Javier | | | | | | 2023/06/20 | | | | | | | |
| Dibujó | | Ing. Guerrero Javier | | | | | | 2023/06/20 | | | | | | | |
| Revisó | | Ing. Pozo Edwin | | | | 2023/06/21 | | Materiales: PLA | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | |
| Aprobó | | Ing. Aquino Miguel | | | | 2023/06/21 | | Nombre de archivo: Eje | | | | | | | |

1

2

3

4

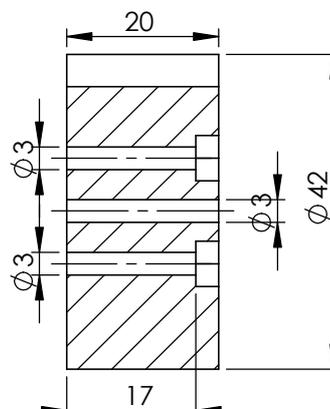
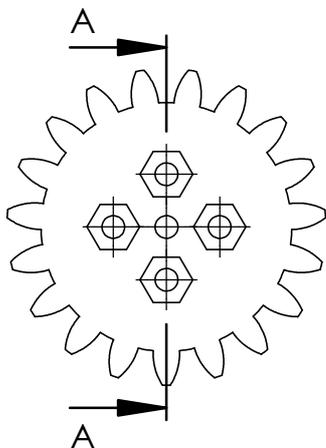
A

B

C

D

E



SECCIÓN A-A

| | |
|----------------|-------|
| m | 2 |
| Z1 | 19 |
| Ángulo presión | 20 |
| De | 42 mm |



| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|--|--------------|--|--|--|---|--|--|--|-------|--|-----------|--|
| N°. Lámina: 15 de 16 | | N°. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | | | | | | | | |
| Datos | | Nombre | | Firma | | | | | | | | Fecha | | Peso [Kg] | |
| Proyectó | | Ing. Guerrero Javier | | | | 2023/06/20 | | | | ±0.3 [mm] | | 1:1 | | | |
| Dibujó | | Ing. Guerrero Javier | | | | 2023/06/20 | | | | | | | | | |
| Revisó | | Ing. Pozo Edwin | | | | 2023/06/21 | | Materiales: ABS | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | |
| Aprobó | | Ing. Aquino Miguel | | | | 2023/06/21 | | Nombre de archivo: Piñon | | | | | | | |



1

2

3

4

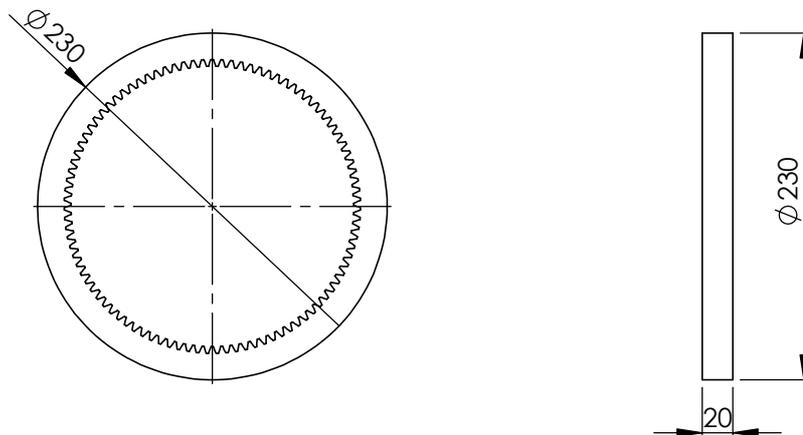
A

B

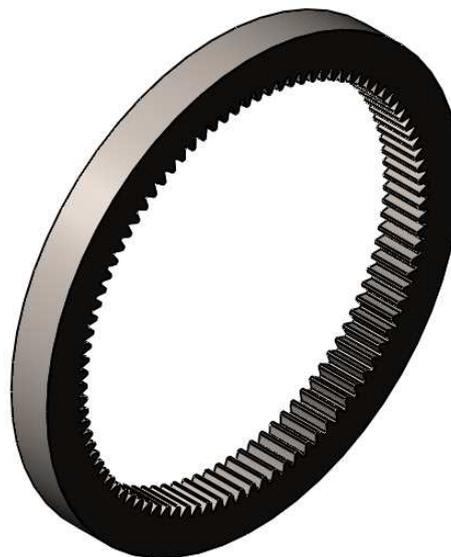
C

D

E



| | |
|----------------|--------|
| m | 2 |
| Z2 | 95 |
| Ángulo presión | 20 |
| De | 230 mm |



| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|--|--------------|--|--|--|---|--|--|--|--------|--|----------|--|
| N°. Lámina: 16 de 16 | | N°. Hojas: 16 | | Sustitución: | | Codificación: IPEC-RC-D-001-03-2023 | | ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | | | | | |
| Email: javierguerreroj@gmail.com Teléfonos: 0984629235 | | | | | | PLANOS REHABILITADOR MUÑECA | | Peso [Kg] | | Tolerancia | | Escala | | Registro | |
| Datos | | Nombre | | Firma | | | | Fecha | | ±0.3 [mm] | | 1:5 | | | |
| Proyectó | | Ing. Guerrero Javier | | | | 2023/06/20 | | Materiales: ABS | | ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY | | | | | |
| Dibujó | | Ing. Guerrero Javier | | | | 2023/06/20 | | | | | | | | | |
| Revisó | | Ing. Pozo Edwin | | | | 2023/06/21 | | Nombre de archivo: Engrane Planetario | | | | | | | |
| Aprobó | | Ing. Aquino Miguel | | | | 2023/06/21 | | | | | | | | | |

ANEXO B: MANUAL DE OPERACION

1. Conecte el prototipo exoesqueleto a la fuente de 110 V
2. Encienda el prototipo con el botón ON – OFF



3. Colocar la mano y antebrazo en el prototipo sujetando firmemente con las correas de sujeción
4. Seleccionar en el menú Selección Mano, con la tecla 1 y acepto con “ * “.



5. Selecciono la mano izquierdo o derecha, con la tecla 1 o 2 y acepto con la tecla “ * ”.



6. Seleccione el tipo de rehabilitación que desee realizar con el teclado opción 1, 2 o 3. Para aceptar con la tecla “ * ”.



6. Una vez seleccionado el tipo de rehabilitación en el menú se procede a asignar los grados para la rutina. Para seleccionar con la tecla 1 o 2 y acepto con la tecla " * ", Ingreso el valor de los grados necesarios con el teclado y acepto con la tecla " * ". En la pantalla le indicará cual es el rango en grados máximos.



7. En el menú selecciono el tiempo con la tecla 3 y acepto con la tecla " * ",



8. En el menú selecciono 3 y acepto con " * ", ingreso con el teclado el número de repeticiones en determinado tiempo y acepto con la tecla " * " dos veces.



9. Para iniciar la rehabilitación con la tecla "A". Se visualiza que se enciende la luz verde de inicio de la sesión de la rehabilitación.



En la pantalla mientras realiza la rehabilitación indica los ángulos, el tiempo y las repeticiones.

10. Una vez finalizado la sesión en la pantalla mostrara el siguiente mensaje.



11. Con la tecla “D” se regresa al menú inicial y poder iniciar con otro tipo de rehabilitación.



ANEXO C: PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON ARDUINO

```
#include <Keypad.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Servo.h>

Servo servo_1;
Servo servo_2;
Servo servo_3;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);

const byte filas = 4; //four rows
const byte columnas= 4; //three columns
byte pinesfilas[filas] = {37, 35, 33, 31}; //connect to the row pinouts
of the keypad
byte pinescolumnas[columnas] = {29, 27, 25, 23}; //connect to the
column pinouts of the keypad

char tecla[filas][columnas] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'},
};

Keypad teclado = Keypad(makeKeymap(tecla), pinesfilas, pinescolumnas,
filas, columnas);
int
i=0,a=1,b=0,c=0,d=0,e=0,valor_grados_1=0,valor_grados_2=0,valor_repeticio
nes=0,valor_tiempo=0,mano=0,tipo_rehabilitacion=0,t=0;
char key=' ';
/// led
int led=3;
// Variables del ingreso numérico
int num=0,n=0;
/// VARIABLES PARA CONTROL
int minutes = 0; // Tiempo en minutos ingresado por el usuario
int repetitions = 0; // Número de repeticiones ingresado por el usuario

unsigned long previousMillis = 0; // Tiempo anterior en milisegundos
unsigned long intervalo = 0,u=1; // Intervalo de tiempo para mover el
servo

int angulo_servo=0,angulo_aux_1=0,angulo_aux_2=0;
int lectura_angulo=0;
void setup()
{
  teclado.setDebounceTime(50);
```

```

Serial.begin(9600);
servo_1.attach(11); // SERVO PARA ABDUCCION - ADUCCION
servo_2.attach(10); //EXTENSION Y FLEXION
servo_3.attach(9); // PRONACION SUPINACION
servo_1.write(90);
delay(500);
servo_2.write(90);
delay(500);
servo_2.write(90);
delay(500);
pinMode(led,OUTPUT);
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("PROTOTIPO AUTOMATICO");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(" DE EXOESQUELETO");
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print(" JAVIER GUERRERO");
for(i=0;i<=19;i++)
{
    lcd.setCursor(i,3);
    lcd.print("*");
    delay(500);
}
delay(100);
lcd.clear();
menu();
lcd.clear();
delay(100);
}

void loop()
{
    // mano 1 = izquierda 2 derecha
    if (mano== 1 &&
tipo_rehabilitacion==1) angulo_aux_1=90+valor_grados_1; //aduccion
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==2) angulo_aux_2=90-
valor_grados_2; //abduccion
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==4) angulo_aux_2=90-
valor_grados_2; //extension
    if (mano== 1 &&
tipo_rehabilitacion==3) angulo_aux_1=90+valor_grados_1; //flexion
    if (mano== 1 &&
tipo_rehabilitacion==5) angulo_aux_1=90+valor_grados_1; //pronacion
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==6) angulo_aux_2=90-
valor_grados_2; //supinacion
    //derecha

```

```

    if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==1) angulo_aux_1=90-
valor_grados_1; //aduccion
    if (mano== 2 &&
tipo_rehabilitacion==2) angulo_aux_2=90+valor_grados_2; //abduccion
    if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==4) angulo_aux_2=90-
valor_grados_2; //extension
    if (mano== 2 &&
tipo_rehabilitacion==3) angulo_aux_1=90+valor_grados_1; //flexion
    if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==5) angulo_aux_1=90-
valor_grados_1; //pronacion
    if (mano== 2 &&
tipo_rehabilitacion==6) angulo_aux_2=90+valor_grados_2; //supinacion
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("ANGULOS: ");
    lcd.print(valor_grados_1);
    lcd.print(" - ");
    lcd.print(valor_grados_2);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("REPETICIONES: ");
    lcd.print( valor_repeticiones);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("TIEMPO: ");
    lcd.print(valor_tiempo);
    unsigned long interval_aux = (long(valor_tiempo)*long(60)*long(1000));
    intervalo=(interval_aux/(long(valor_repeticiones)*long(valor_grados_1+v
alor_grados_2)))/long(1);

while (t==0)
{
    digitalWrite(led,HIGH);
    delay(10);
    for (i = 0; i < valor_repeticiones; i++)
    {
        if (angulo_aux_1>90 && angulo_aux_2<90)
        {
            for (int j=90;j<=angulo_aux_1;j++)
            {

                if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
servo_1.write(j);
                if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
servo_2.write(j);
                if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
servo_3.write(j);
                delay(intervalo);
                u=u+1;
                lcd.setCursor(0,3);
                lcd.print("A.M: ");

```

```

        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
lectura_angulo=servo_1.read();
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
lectura_angulo=servo_2.read();
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
lectura_angulo=servo_3.read();
        lcd.print(lectura_angulo);
        lcd.print(" ");
        lcd.print("T.T: ");
        lcd.print(intervalo*u/long(1000));
        lcd.print(" ");
    }
    for (int j=angulo_aux_1;j>=90;j--)
    {
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
servo_1.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
servo_2.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
servo_3.write(j);
        delay(intervalo);
        u=u+1;
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("A.M: ");
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
lectura_angulo=servo_1.read();
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
lectura_angulo=servo_2.read();
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
lectura_angulo=servo_3.read();
        lcd.print(lectura_angulo);
        lcd.print(" ");
        lcd.print("T.T: ");
        lcd.print(intervalo*u/long(1000));
        lcd.print(" ");
    }
    for (int j=90;j>=angulo_aux_2;j--)
    {

        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
servo_1.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
servo_2.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
servo_3.write(j);
        delay(intervalo);
        u=u+1;
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("A.M: ");

```

```

        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
lectura_angulo=servo_1.read();
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
lectura_angulo=servo_2.read();
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
lectura_angulo=servo_3.read();
        lcd.print(lectura_angulo);
        lcd.print(" ");
        lcd.print("T.T: ");
        lcd.print(intervalo*u/long(1000));
        lcd.print(" ");
    }
    for (int j=angulo_aux_2;j<=90;j++)
    {
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
servo_1.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
servo_2.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
servo_3.write(j);
        delay(intervalo);
        u=u+1;
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("A.M: ");
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
lectura_angulo=servo_1.read();
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
lectura_angulo=servo_2.read();
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
lectura_angulo=servo_3.read();
        lcd.print(lectura_angulo);
        lcd.print(" ");
        lcd.print("T.T: ");
        lcd.print(intervalo*u/long(1000));
        lcd.print(" ");
    }
}
////////// para mano derecha
if (angulo_aux_1<90 && angulo_aux_2>90)
{
    for (int j=90;j>=angulo_aux_1;j--)
    {

        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
servo_1.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
servo_2.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
servo_3.write(j);
    }
}

```

```

        delay(intervalo);
        u=u+1;
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("A.M: ");
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
lectura_angulo=servo_1.read();
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
lectura_angulo=servo_2.read();
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
lectura_angulo=servo_3.read();
        lcd.print(lectura_angulo);
        lcd.print(" ");
        lcd.print("T.T: ");
        lcd.print(intervalo*u/long(1000));
        lcd.print(" ");
    }
    for (int j=angulo_aux_1;j<=90;j++)
    {
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
servo_1.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
servo_2.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
servo_3.write(j);
        delay(intervalo);
        u=u+1;
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("A.M: ");
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
lectura_angulo=servo_1.read();
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
lectura_angulo=servo_2.read();
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
lectura_angulo=servo_3.read();
        lcd.print(lectura_angulo);
        lcd.print(" ");
        lcd.print("T.T: ");
        lcd.print(intervalo*u/long(1000));
        lcd.print(" ");
    }
    for (int j=90;j<=angulo_aux_2;j++)
    {

        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
servo_1.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
servo_2.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
servo_3.write(j);

```

```

        delay(intervalo);
        u=u+1;
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("A.M: ");
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
lectura_angulo=servo_1.read();
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
lectura_angulo=servo_2.read();
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
lectura_angulo=servo_3.read();
        lcd.print(lectura_angulo);
        lcd.print(" ");
        lcd.print("T.T: ");
        lcd.print(intervalo*u/long(1000));
        lcd.print(" ");
    }
    for (int j=angulo_aux_2;j>=90;j--)
    {
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
servo_1.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
servo_2.write(j);
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
servo_3.write(j);
        delay(intervalo);
        u=u+1;
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("A.M: ");
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==2)
lectura_angulo=servo_1.read();
        if (tipo_rehabilitacion==3 || tipo_rehabilitacion==4)
lectura_angulo=servo_2.read();
        if (tipo_rehabilitacion==5 || tipo_rehabilitacion==6)
lectura_angulo=servo_3.read();
        lcd.print(lectura_angulo);
        lcd.print(" ");
        lcd.print("T.T: ");
        lcd.print(intervalo*u/long(1000));
        lcd.print(" ");
    }
}

}

t=1;
lcd.clear();
}
while(t==1)
{
    digitalWrite(led,LOW);

```

```

delay(10);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("FINALIZADO ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("REHABILITADOR");
teclado4x4();
t=0;
c=0;
b=0;
a=1;
u=0;
intervalo=0;
interval_aux=0;
if (num==10) menu();

}
}

void menu()
{
  lcd.clear();
  e=0;
  while(a==1)
  {
    if (c==0)
    {
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("      >MENU<");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("1.SELECCION MANO");
      lcd.setCursor(0,2);
      lcd.print("2.REHABILITACION");
      lcd.setCursor(0,3);
      lcd.print("3.TIEMPO");
    }
    key = teclado.getKey();
    if (key)
    {
      // Actualización de la opción seleccionada
      switch (key)
      {
        case '1':
          c=1;
          a=2;
          lcd.clear();
          submenus();
          break;
        case '2':

```

```

        c=2;
        a=2;
        b=0;
        lcd.clear();
        submenus();
    break;
case '3':
    c=9;
    a=3;
    key=' ';
    lcd.clear();
    delay(300);
    valores();
    break;

    case 'A':
        lcd.clear();
        delay(100);
        a=0;
        break;
    }
}
delay(100);
}
}

void submenus()
{
    while(a==2)
    {
        if (c==1 && b==0)
        {
            lcd.setCursor(0,0);
            lcd.print("SELECCION MANO");
            lcd.setCursor(0,1);
            lcd.print("1.IZQUIERDA");
            lcd.setCursor(0,2);
            lcd.print("2.DERECHA");
        }
        if (c==2 && b==0)
        {
            lcd.setCursor(0,0);
            lcd.print("REHABILITACION");
            lcd.setCursor(0,1);
            lcd.print("1.ABDUCCION-ADUCCION");
            lcd.setCursor(0,2);
            lcd.print("2.FLEXION-EXTENSION");
        }
    }
}

```

```

    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("3.PRONACION-SUPINACI");
}
if (d==1 && b==1)
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("  SELECCIONE");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("1.ADUCCION");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("2.ABDUCCION");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("3.REPETICIONES");
}
if (d==2 && b==1)
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("  SELECCIONE");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("1.FLEXION");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("2.EXTENSION");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("3.REPETICIONES");
}
if (d==3 && b==1)
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("  SELECCIONE");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("1.PRONACION");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("2.SUPINACION");
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("3.REPETICIONES");
}

key = teclado.getKey();
if (key)
{
    // Actualización de la opción seleccionada
    switch (key)
    {
        case '1':
            if(c==1 && b==0)
            {
                lcd.clear();
                mano=1; //mano izquierda
                a=1;
            }
        }
    }
}

```

```

c=0;
b=0;
key=' ';
delay(10);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("SELECCIONADO");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("MANO");
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("IZQUIERDA");
delay(2000);
lcd.clear();
menu();
}
if(c==2 && b==0)
{
  lcd.clear();
  d=1;
  b=1;
  key=' ';
  delay(10);
  break;
}
if (d==1 && b==1)
{
  lcd.clear();
  tipo_rehabilitacion=1; //tipo aduccion
  key=' ';
  delay(10);
  a=3;
  c=7;
  valores();
  break;
}
if (d==2 && b==1)
{
  lcd.clear();
  tipo_rehabilitacion=3; //tipo flexion
  key=' ';
  delay(10);
  a=3;
  c=7;
  valores();
  break;
}
if (d==3 && b==1)
{
  lcd.clear();
  tipo_rehabilitacion=5; //tipo pronacion

```

```

        key=' ';
        delay(10);
        a=3;
        c=7;
        valores();
        break;
    }
break;
case '2':
    if(c==1 && b==0 )
    {
        lcd.clear();
        mano=2; //mano derecha
        a=1;
        c=0;
        b=1;
        key=' ';
        delay(10);
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("SELECCIONADO");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("MANO");
        lcd.setCursor(0,2);
        lcd.print("DERECHA");
        delay(2000);
        lcd.clear();
        menu();
    }
    if(c==2 && b==0)
    {
        lcd.clear();
        d=2;
        b=1;
        key=' ';
        delay(10);
        break;
    }
    if (d==1 && b==1)
    {
        lcd.clear();
        tipo_rehabilitacion=2; //tipo abduccion
        key=' ';
        delay(10);
        a=3;
        c=7;
        valores();
        break;
    }
    if (d==2 && b==1)

```

```

{
    lcd.clear();
    tipo_rehabilitacion=4; //tipo extension
    key=' ';
    delay(10);
    a=3;
    c=7;
    valores();
    break;
}
if (d==3 && b==1)
{
    lcd.clear();
    tipo_rehabilitacion=6; //tipo pronacion
    key=' ';
    delay(10);
    a=3;
    c=7;
    valores();
    break;
}
break;
case '3':
if(c==2 && b==0)
{
    lcd.clear();
    d=3;
    b=1;
    key=' ';
    delay(10);
    break;
}
if (d==1 && b==1)
{
    lcd.clear();
    a=3;
    c=8;
    key=' ';
    delay(10);
    valores();
    break;
}
if (d==2 && b==1)
{
    lcd.clear();
    a=3;
    c=8;
    key=' ';
    delay(10);

```

```

        valores();
        break;
    }
    if (d==3 && b==1)
    {
        lcd.clear();
        a=3;
        c=8;
        key=' ';
        delay(10);
        valores();
        break;
    }
    break;
    case '*':
    a=1;
    c=0;
    b=0;
    key=' ';
    lcd.clear();
    delay(10);
    menu();
    break;
}
}
delay(100);

}
menu();
}

```

```

void teclado4x4()
{
    do
    {
        key = teclado.getKey();
    }
    while (key == NO_KEY);
    conversion();
}

```

```

void conversion()
{
    if (key=='0')
    {
        num=0;
    }
}

```

```
else if (key=='1')
{
    num=1;
}
else if (key=='2')
{
    num=2;
}
else if (key=='3')
{
    num=3;
}
else if (key=='4')
{
    num=4;
}
else if (key=='5')
{
    num=5;
}
else if (key=='6')
{
    num=6;
}
else if (key=='7')
{
    num=7;
}
else if (key=='8')
{
    num=8;
}
else if (key=='9')
{
    num=9;
}
else if (key=='D') ///borrar
{
    num=10;
}
else
{
    num=11;
}
}

void valores()
{
    while (a==3)
```

```

{
  if (c==7)
  {
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("  INGRESAR GRADOS");
    lcd.setCursor(0,1);
    //izquierda
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==1) lcd.print("      (0-
30)"); //aduccion
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==2) lcd.print("      (0-
25)"); //abduccion
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==4) lcd.print("      (0-
35)"); //extension
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==3) lcd.print("      (0-
50)"); //flexion
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==5) lcd.print("      (0-
90)"); //pronacion
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==6) lcd.print("      (0-
60)"); //supinacion
    //derecha
    if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==1) lcd.print("      (0-
30)"); //aduccion
    if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==2) lcd.print("      (0-
25)"); //abduccion
    if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==4) lcd.print("      (0-
35)"); //extension
    if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==3) lcd.print("      (0-
50)"); //flexion
    if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==5) lcd.print("      (0-
90)"); //pronacion
    if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==6) lcd.print("      (0-
60)"); //supinacion
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("VALOR: ");
    if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==3 ||
tipo_rehabilitacion==5 )
    {
      valor_grados_1= n;
      lcd.print(valor_grados_1);
    }
    if (tipo_rehabilitacion==2 || tipo_rehabilitacion==4 ||
tipo_rehabilitacion==6 )
    {
      valor_grados_2= n;
      lcd.print(valor_grados_2);
    }
    lcd.print("  ");
  }
  if (c==8)

```

```

{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("VALOR REPETICIONES");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("VALOR: ");
    valor_repeticiones=n;
    lcd.print(valor_repeticiones);
    lcd.print("  ");
}
if (c==9)
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("INGRESAR TIEMPO");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("VALOR: ");
    valor_tiempo=n;
    lcd.print(valor_tiempo);
    lcd.print("  ");
}
for(i=1;i<=3 && e==0;i++)
{
    teclado4x4();
    if(num==10)
    {
        n=0;
        num=0;
        i=1;
        e=0;
        valor_tiempo=n;
        valor_repeticiones=n;
        valor_grados_1=n;
        valor_grados_2=n;
        delay(200);
    }
    if(num==11)
    {
        i=6;
    }
    else
    {
        n=n*10+num;
        if (c==7)
        {
            lcd.setCursor(0,0);
            lcd.print("  INGRESAR GRADOS");
            lcd.setCursor(0,1);
            //izquierda
            if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==1) lcd.print("      (0-
30)"); //aduccion

```

```

        if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==2) lcd.print("      (0-
25)"); //abduccion
        if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==4) lcd.print("      (0-
35)"); //extension
        if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==3) lcd.print("      (0-
50)"); //flexion
        if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==5) lcd.print("      (0-
90)"); //pronacion
        if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==6) lcd.print("      (0-
60)"); //supinacion
        //derecha
        if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==1) lcd.print("      (0-
30)"); //aduccion
        if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==2) lcd.print("      (0-
25)"); //abduccion
        if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==4) lcd.print("      (0-
35)"); //extension
        if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==3) lcd.print("      (0-
50)"); //flexion
        if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==5) lcd.print("      (0-
90)"); //pronacion
        if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==6) lcd.print("      (0-
60)"); //supinacion
        lcd.setCursor(0,2);
        lcd.print("VALOR: ");
        if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==3 ||
tipo_rehabilitacion==5 )
        {
            valor_grados_1= n;
            lcd.print(valor_grados_1);
        }
        if (tipo_rehabilitacion==2 || tipo_rehabilitacion==4 ||
tipo_rehabilitacion==6 )
        {
            valor_grados_2= n;
            lcd.print(valor_grados_2);
        }
        lcd.print("  ");
    }
    if (c==8)
    {
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("VALOR REPETICIONES");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("VALOR: ");
        valor_repeticiones=n;
        lcd.print(valor_repeticiones);
        lcd.print("  ");
    }
}

```

```

    if (c==9)
    {
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("INGRESAR TIEMPO");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("VALOR: ");
        valor_tiempo=n;
        lcd.print(valor_tiempo);
        lcd.print("  ");
    }
}

teclado4x4();
if(num==10)
{
    lcd.setCursor(0,0);
    n=0;
    num=0;
    i=1;
    e=0;
    valor_tiempo=n;
    valor_repeticiones=n;
    if (tipo_rehabilitacion==1 || tipo_rehabilitacion==3 ||
tipo_rehabilitacion==5 ) valor_grados_1= n;
    if (tipo_rehabilitacion==2 || tipo_rehabilitacion==4 ||
tipo_rehabilitacion==6 ) valor_grados_2= n;
    delay(200);
}
if(num==11)
{
    a=2;
    lcd.clear();
    if (c==7)
    {
        n=0;
        num=0;
    }
    if (c==8)
    {
        n=0;
        num=0;
    }
    if (c==9)
    {
        n=0;
        num=0;
        a=1;
        b=0;
    }
}

```

```

        c=0;
        menu();
    }
    if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==1 && valor_grados_1>30)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //aducción
    }
    else if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==2 &&
valor_grados_2>25)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //abducción
    }
    else if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==4 &&
valor_grados_2>50)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //extensión
    }
    else if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==3 &&
valor_grados_1>35)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //flexión
    }
    else if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==5 &&
valor_grados_1>90)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //pronación
    }
    else if (mano== 1 && tipo_rehabilitacion==6 &&
valor_grados_2>60)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //supinación
    }
    //derecha
    else if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==1 &&
valor_grados_1>30)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //aducción
    }
    else if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==2 &&
valor_grados_2>25)
    {

```

```

        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //abduccion
    }
    else if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==4 &&
valor_grados_2>50)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //extension
    }
    else if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==3 &&
valor_grados_1>35)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //flexion
    }
    else if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==5 &&
valor_grados_1>90)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //pronacion
    }
    else if (mano== 2 && tipo_rehabilitacion==6 &&
valor_grados_2>60)
    {
        lcd.clear(); a=3;c=7;lcd.setCursor(0,0); lcd.print("ERROR
VALOR ANGULO"); delay(2000); //supinacion
    }
    else
    {
        submenus();
    }
    delay(100);
}
else
{
    e=1;
}
delay(100);
}
}

```

ANEXO D: VALIDACION DEL PROYECTO

TEMA: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO AUTOMÁTICO DE EXOESQUELETO CON MOVIMIENTO MECÁNICO PARA LA REHABILITACIÓN DE LA MUÑECA EN PERSONAS ADULTAS

| ¿El prototipo es capaz de realizar los movimientos para la rehabilitación de la muñeca? | Si | No | Observaciones |
|---|----|----|---------------|
| Flexión – Extensión | ✓ | | |
| Aducción – Abducción | ✓ | | |
| Pronación - Supinación | ✓ | | |
| ¿El prototipo es de fácil manejar para el especialista? | ✓ | | |

| REALIZO | REVISO |
|-----------------|--------|
| Javier Guerrero | |
| Ing. Mecánico | |
| | |
| C.I. 0603321415 | |